

Sarwono  
Sunarroso  
Suyatman



SMA dan MA

# FISIKA 2

Mudah dan Sederhana



**PUSAT PERBUKUAN**  
Departemen Pendidikan Nasional

**Kelas**  
**XI**

**Sarwono  
Sunarroso  
Suyatman**

# **Fisika 2**

**Mudah dan Sederhana**

---

**Untuk SMA dan MA Kelas XI**



**PUSAT PERBUKUAN**  
Departemen Pendidikan Nasional

# Fisika 2

## Mudah dan Sederhana Untuk SMA dan MA Kelas XI

Sarwono  
Sunarroso  
Suyatman

---

Editor Materi	: Cecep Agung Prasetyo Adiek Novita Ratna Mardiaty
Editor Bahasa	: Sri Iswanti Mutmainah
Design Cover	: Hary Suyadi
Setting/Layout	: H. J. Priotomo dan B. Wahyono

---

530.07

Sar  
f

Sarwono

Fisika 2 : Mudah dan Sederhana Untuk SMA/MA Kelas XI /  
Sarwono, Sunarroso, Suyatman : Editor Cecep Agung Prasetyo,  
Adiek Novita Ratna Mardiaty. — Jakarta : Pusat Perbukuan,  
Departemen Pendidikan Nasional, 2009.  
vi, 202 hlm. : illus. : 25 cm.

Bibliografi : hlm.194-195

Indeks

ISBN 798-799-068-166-8 (no jld lengkap)

ISBN 798-799-068-171-2

1.Fisika-Studi dan Pengajaran 2. Sunarroso  
3. Suyatman 4. Prasetyo, Cecep Agung  
5. Mardiaty, Adiek Novita Ratna 6. Judul

---

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan  
Nasional dari CV Putra Nugraha

---

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan  
Departemen Pendidikan Nasional  
Tahun 2009

Diperbanyak oleh ....

---



# KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2008, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 27 Tahun 2007 tanggal 25 Juli 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Februari 2009

Kepala Pusat Perbukuan



# KATA PENGANTAR

Fisika sulit, rumit dan membingungkan! Betulkah itu? Jika hal itu ditanyakan kepada para siswa, maka serta merta mereka mungkin akan menjawab “Ya.....!” Tapi dalam buku ini, fisika menjadi mudah! Mengapa? Karena disajikan secara sederhana dan merunut pada hirarki ilmiah sesuai keterkaitan antarsubstansinya.

Di setiap pembahasan konsep selalu dilengkapi dengan fakta-fakta yang kontekstual. Berdasarkan fakta-fakta ini, siswa dibimbing untuk menganalisis hingga dapat menarik kesimpulan. Untuk mendukung proses ilmiahnya, siswa juga didorong melakukan observasi dan eksperimen yang terkait dengan proses pengenalan teori-teori dalam fisika.

Dengan pengenalan teori-teori fisika secara inkuiri ini, diharapkan siswa lebih tanggap terhadap fenomena-fenomena alam serta mampu mengapresiasi teknologi sebagai suatu sarana untuk mengelola alam itu sendiri. Pada akhirnya, siswa akan menjadi manusia yang bijak dalam mengelola alam dengan teknologinya.

Agustus 2007

Penulis

# ● PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU ●

## Langkah 1

Pelajari dan pahami teori-teori dan konsep-konsep fisika dengan metode inkuiri dan berpola masyarakat belajar yang dikembangkan dalam buku ini.

## Langkah 2

Pelajari dan lakukan kegiatan-kegiatan praktik untuk mengembangkan kemampuan psikomotorik.

## Langkah 3

Kerjakan tugas-tugas kelompok dan diskusi untuk mengembangkan kepekaan sosial.

## Langkah 4

Pelajari contoh-contoh untuk membimbing ketrampilan dalam menyelesaikan masalah.

## Langkah 5

Kerjakan Uji Pemahaman untuk merefleksikan kemampuan kognitif sesuai tuntutan kurikulum.

## Langkah 6

Setelah kalian memiliki kemampuan yang disyaratkan, coba uji diri kalian dengan menyelesaikan soal-soal pada Uji Kompetensi. Mintalah Bapak/Ibu Guru untuk mengapresiasi hasil pekerjaan Anda!

## Langkah 7

Untuk mengembangkan kemampuan afektif/sikap dari jiwa kewirausahaan, coba kerjakan tugas proyek yang disediakan!

# DAFTAR ISI

KATA SAMBUTAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
<b>BAB I KINEMATIKA PARTIKEL DENGAN ANALISIS VEKTOR .....</b>	<b>1</b>
A. Bidang Gerak Partikel .....	3
B. Posisi Partikel dalam Satuan Vektor .....	3
C. Perpindahan .....	4
D. Kecepatan Sesaat ( $v_t$ ) dalam Satu Dimensi .....	6
E. Kecepatan Sesaat ( $v_t$ ) dalam Dua Dimensi .....	8
F. Analisis Gerak Lurus dengan Vektor .....	10
G. Analisis Gerak Melingkar dengan Vektor .....	13
H. Analisis Gerak Parabola dengan Vektor .....	20
Uji Kompetensi .....	26
<b>BAB II KETERATURAN GERAK PLANET .....</b>	<b>29</b>
A. Hukum-Hukum Kepler .....	31
B. Hukum-Hukum Newton .....	36
Uji Kompetensi .....	41
<b>BAB III ELASTISITAS BAHAN .....</b>	<b>43</b>
A. Pengaruh Gaya Terhadap Elastisitas Bahan .....	45
B. Modulus Young .....	46
C. Elastisitas Pegas .....	49
D. Energi Potensial Pegas .....	52
E. Susunan Pegas .....	54
Uji Kompetensi .....	58
<b>BAB IV DINAMIKA GETARAN .....</b>	<b>61</b>
A. Getaran Harmonik Sederhana .....	64
B. Gaya Getaran .....	69
C. Energi Pada Getaran Harmonik .....	72
Uji Kompetensi .....	75
<b>BAB V USAHA DAN ENERGI .....</b>	<b>77</b>
A. Usaha .....	79
B. Energi .....	82
C. Hubungan Usaha dan Energi .....	85



D. Hukum Kekekalan Energi Mekanik .....	89
E. Penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik .....	92
Uji Kompetensi .....	94
<b>BAB VI IMPULS DAN MOMENTUM .....</b>	<b>97</b>
A. Pengertian Momentum dan Impuls .....	99
B. Hukum Kekekalan Momentum .....	101
C. Tumbukan .....	104
Uji Kompetensi .....	110
<b>ULANGAN BLOK SEMESTER GASAL .....</b>	<b>111</b>
<b>BAB VII ROTASI BENDA TEGAR .....</b>	<b>113</b>
A. Pengertian Benda Tegar .....	115
B. Pengaruh Torsi Terhadap Benda Tegar .....	115
C. Gerak Translasi dan Gerak Rotasi .....	118
D. Hukum Kekekalan Momentum Sudut .....	122
E. Gerak Menggelinding .....	124
F. Titik Berat Benda .....	127
Uji Kompetensi .....	132
<b>BAB VIII FLUIDA .....</b>	<b>133</b>
A. Fluida Statis .....	135
B. Fluida Dinamis .....	149
Uji Kompetensi .....	163
<b>BAB IX TEORI KINETIK GAS DAN TERMODINAMIKA .....</b>	<b>165</b>
A. Teori Kinetik Gas .....	167
B. Persamaan Gas Ideal .....	167
C. Tekanan dan Ketetapan Gas Ideal .....	169
D. Kecepatan Efektif Gas Ideal .....	172
E. Suhu dan Energi Kinetik Gas Ideal .....	174
F. Termodinamika .....	175
G. Mesin Carnot .....	186
Uji Kompetensi .....	190
<b>ULANGAN BLOK SEMESTER GENAP .....</b>	<b>191</b>
<b>KUNCI JAWABAN .....</b>	<b>193</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>194</b>
<b>GLOSARIUM .....</b>	<b>196</b>
<b>INDEKS .....</b>	<b>198</b>
<b>DAFTAR PLANET .....</b>	<b>200</b>
<b>DAFTAR KONSTANTA .....</b>	<b>201</b>



# BAB 1

## KINEMATIKA DENGAN ANALISIS VEKTOR

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep gerak lurus, gerak melingkar, dan gerak parabola; serta dapat menggunakannya dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Posisi
- Gerak Lurus
- Gerak Parabola
- Vektor
- Gerak Melingkar



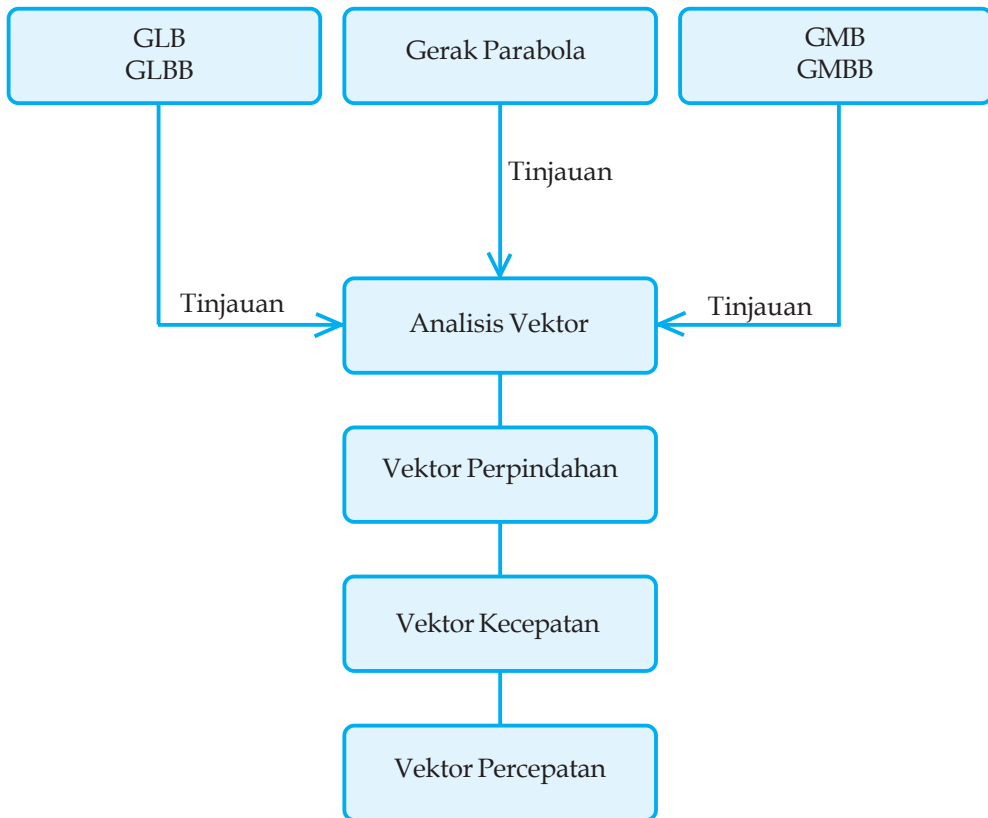
Sumber: Encarta Encyclopedia, 2006.

**Gambar 1.1** Mobil yang sedang melaju pada lintasan lurus dapat dikatakan melakukan gerak lurus.

Pada awal kelas X Anda telah mempelajari GLB dan GLBB serta gabungan dua gerak tersebut. Pembahasan materi-materi tersebut hanya pada lingkup permasalahan yang terkait dengan lintasan, kecepatan, percepatan dan waktu tanpa memunculkan penyebab gerak itu sendiri. Jika Anda cermati, besaran-besaran yang ada pada gerak ini merupakan fungsi terhadap waktu. Secara matematis dengan hanya mengoperasikan fungsi-fungsi ini, Anda dapat menganalisis serta mengetahui besaran-besaran lain yang terkait. Untuk lebih memahami, coba ikuti pembahasan berikut!



Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini,  
perhatikan peta konsep berikut !



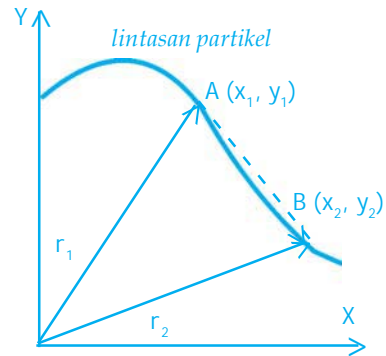
## A. Bidang Gerak Partikel

Sebuah mobil bergerak, apa yang dapat Anda amati? Tentu ada posisi dan kecepatan, bahkan mungkin ada percepatan. Ketiga besaran tersebut tidak mungkin terlepas dari pengaruh waktu, secara matematis dapat dituliskan  $r(t)$ ;  $v(t)$ ; dan  $a(t)$ . Dalam bidang dua dimensi,  $r(t)$  merupakan posisi partikel diukur dari partikel koordinat  $O(0,0)$ .

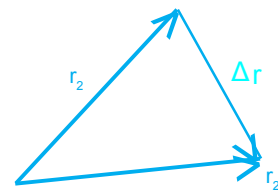
Jika mobil kita ganti dengan partikel, maka lintasannya dapat kita lihat seperti tampak pada Gambar 1.2. Jika diamati gerak mobil dari posisi awal (titik A) sampai posisi akhir (titik B) memerlukan selang waktu  $\Delta t$ , maka mobil tersebut akan mengalami perpindahan sebesar  $\Delta r$ .

Oleh karena itu, dapat Anda simpulkan bahwa pada gerakan partikel ini terdapat perubahan posisi partikel dari  $r_1$  ke  $r_2$ . Perhatikan Gambar 1.3! Berdasarkan pendekatan vektor dapat ditarik hubungan berikut.

$$r_1 + \Delta r = r_2 \quad \text{atau} \quad \Delta r = r_2 - r_1$$



**Gambar 1.2** Gerak partikel yang berpindah dalam selang waktu  $\Delta t$ .



**Gambar 1.3** Vektor posisi  $r_1$  dan  $r_2$ .

## B. Posisi Partikel dalam Satuan Vektor

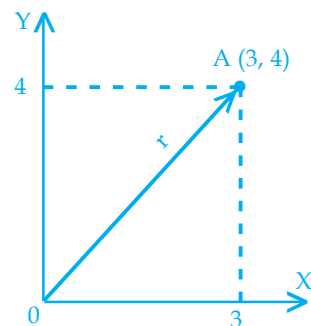
Anda perhatikan vektor posisi A pada Gambar 1.4! Vektor  $r$  menyatakan pergeseran dari  $O(0,0)$  ke titik  $A(3,4)$ . Untuk menyatakan vektor  $r$  ini dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$r = 3\hat{i} + 4\hat{j}$$

Keterangan :

$\hat{i}$  : vektor satuan dalam arah sumbu X

$\hat{j}$  : vektor satuan dalam arah sumbu Y

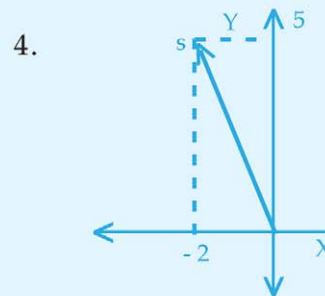
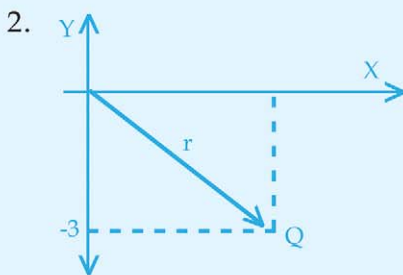
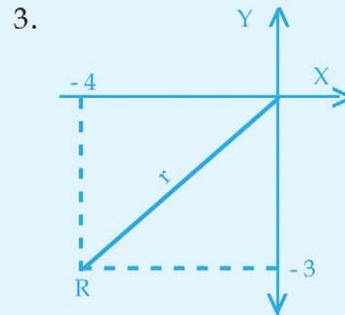
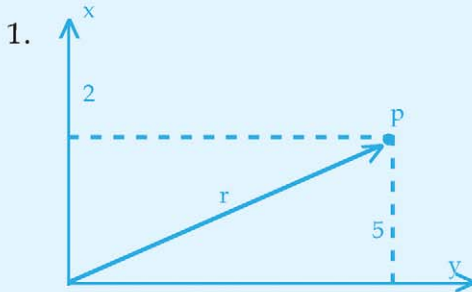


**Gambar 1.4** Vektor  $r$ .

## TUGAS



Nyatakan vektor-vektor  $r$  berikut dalam persamaan vektor satuan!

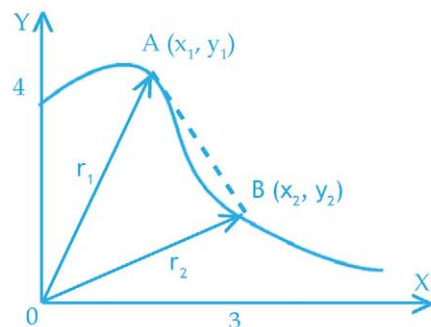


## C. Perpindahan

Coba Anda ingat apa beda antara perpindahan dan jarak! Di kelas X telah dibahas bahwa perpindahan adalah besaran vektor, sedangkan jarak adalah besaran skalar. Perhatikan Gambar 1.5!

Berdasarkan grafik di samping, dapat dijelaskan sebagai berikut. Dalam selang waktu  $\Delta t$ , benda berpindah dari  $r_1$  ke  $r_2$ . Dengan analisis vektor diketahui  $r_1 = x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j}$  dan

$r_2 = x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j}$ , sehingga  $\Delta r = r_2 - r_1$  merupakan vektor perpindahannya.



Gambar 1.5 Grafik gerak partikel.



Karena  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ , maka :

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j}) - (x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j})$$

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1) \hat{i} + (y_2 - y_1) \hat{j} \quad \text{atau} \quad \Delta \mathbf{r} = \Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j}$$

Jarak (s) adalah besar dari perpindahan yang secara matematik dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} s &= |\Delta \mathbf{r}| \\ &= \sqrt{(\Delta x)^2 \hat{i}^2 + (\Delta y)^2 \hat{j}^2} \end{aligned}$$

Perlu Anda ketahui bahwa nilai dari  $\hat{i}^2 = \hat{i} \times \hat{i} = 1$  dan  $\hat{j}^2 = \hat{j} \times \hat{j} = 1$  (Anda buka kembali buku kelas X subbab vektor!). Sehingga s dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$



### CONTOH SOAL

Sebuah partikel bergerak dari A (1 m, -3 m) ke B (5 m, 0 m) dalam selang waktu 5 sekon. Tentukan vektor perpindahannya, jarak yang ditempuh oleh partikel, dan kelajuan rata-rata partikel!

Diketahui : A (1 m, -3 m)  $\mathbf{r}_A = (1 \hat{i} - 3 \hat{j}) \text{ m}$

B (5 m, 0 m)  $\mathbf{r}_B = (5 \hat{i} + 0 \hat{j}) \text{ m}$

$\Delta t = 5 \text{ sekon}$

Ditanyakan: a.  $\Delta \mathbf{r} = \dots?$

b.  $s = \dots?$

c.  $v = \dots?$

Jawab :

a.  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$

$$= (x_B - x_A) \hat{i} + (y_B - y_A) \hat{j}$$

$$= (5 - 1) \hat{i} + (0 - (-3)) \hat{j}$$

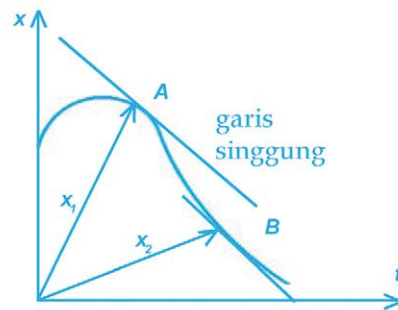
$$= 4 \hat{i} + 3 \hat{j}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. } s &= \Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \\
 &= \sqrt{4^2 + 3^2} \\
 &= \sqrt{16 + 9} \\
 &= \sqrt{25} \\
 &= 5 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\text{c. } v = \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right| = \frac{5}{5} = 1 \text{ m/s}$$

## D. Kecepatan Sesaat ( $v_t$ ) Dalam Satu Dimensi

Perhatikan Gambar 1.6! Pada gerak partikel di samping, kecepatan partikel saat benda pada posisi  $x_1$  dan  $x_2$  sama dengan gradien garis singgung di titik A dan di titik B. Ada dua cara yang perlu Anda kenal untuk menentukan gradien garis singgung ini, yaitu cara grafis dan cara turunan fungsi.



Gambar 1.6 : Garis singgung dari suatu partikel yang bergerak berbentuk kurva.

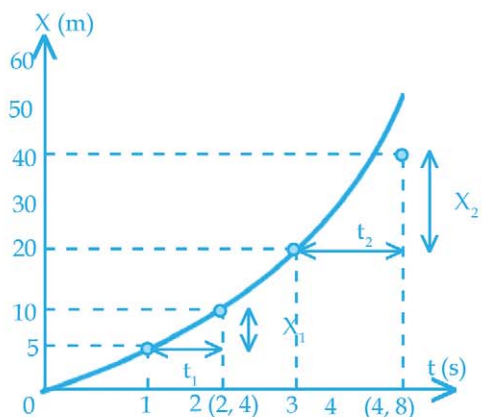
### 1. Cara Grafis

Sebuah partikel bergerak dalam arah sumbu X seperti tampak pada Gambar 1.7. Bagaimana menentukan kecepatan sesaat benda ketika  $t = 1 \text{ s}$  dan  $t = 3 \text{ s}$ ? Perhatikan penjelasan berikut!

**Langkah 1:** Tentukan titik pada grafik pada saat  $t = 1$  sekon.

**Langkah 2:** Gambar garis singgung pada titik tersebut.

**Langkah 3:** Tentukan dua buah titik pada garis hingga bisa dihitung  $\Delta x$  dan  $\Delta t$ .



Gambar 1.7 gerak partikel dalam arah sumbu X.

**Langkah 4:** Hitung nilai  $v_t$  dengan persamaan  $v_t = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ .

Berdasarkan keempat langkah tersebut, maka:

$v_t$  pada Gambar 1.7 saat  $t = 1$  s adalah sebagai berikut.

$$v_t = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{(10-5)\text{m}}{(2,4-1)\text{s}} = \frac{5\text{m}}{1,4\text{s}}$$

$v_t$  pada saat  $t = 3$  sekon adalah:

$$v_t = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = \frac{(40-20)\text{m}}{(4,8-3)\text{s}} = \frac{20\text{m}}{1,8\text{s}} = 11,1 \text{ m/s}$$

## 2. Cara Turunan Fungsi

Sebuah partikel yang bergerak (misal dalam arah sumbu X) ada kalanya posisi benda dinyatakan dalam bentuk fungsi dari waktu  $\{x = f(t)\}$ . Pada kondisi ini kecepatan sesaat benda ( $v_t$ ) merupakan turunan pertama dari

fungsi tersebut. Secara matematis dinyatakan  $v_t = \frac{dx}{dt}$ .

Apakah yang dimaksud dengan turunan fungsi? Jika  $x = at^b$  dengan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta, maka turunan pertama  $x$  terhadap  $t$  adalah

$\frac{dx}{dt} = abt^{(b-1)}$ . Misalkan, diketahui persamaan  $x = 4t^3$ , maka turunan pertamanya adalah  $x = (4 \times 3) \times t^{(3-1)} = 12t^2$ .



### CONTOH SOAL

Sebuah partikel bergerak dalam arah sumbu X dengan posisi benda  $x = 25t - t^2$ . Tentukan kecepatan benda saat  $t = 2$  sekon dan  $t = 5$  s!

Diketahui :  $x = 25t - t^2$

Ditanyakan:  $v_t$  untuk  $t = 2$  sekon = ...?

$v_t$  untuk  $t = 5$  sekon = ...?

Jawab :

$$\begin{aligned} v_t &= \\ &= 25t^0 - 2t^1 \\ &= 25 - 2t \end{aligned}$$

Untuk  $t = 2$  sekon, maka  $v_t = 25 - 2t = 25 - 4 = 21 \text{ m/s}$

Untuk  $t = 5$  sekon maka  $v_t = 25 - 2t = 25 - 10 = 15 \text{ m/s}$



## E. Kecepatan Sesaat ( $\vec{v}_t$ ) Dalam Dua Dimensi

Pada subbab sebelumnya Anda telah mempelajari gerak partikel pada bidang satu dimensi. Dalam subbab kali ini, Anda akan mempelajari gerak partikel dalam bidang dua dimensi. Perhatikan Gambar 1.8! Sebuah partikel bergerak pada bidang XY dengan posisi  $\vec{r}$  merupakan resultan antara posisi  $x(t)$  dan posisi  $y(t)$ . Kecepatan sesaat pada posisi  $\vec{r}$  dinyatakan

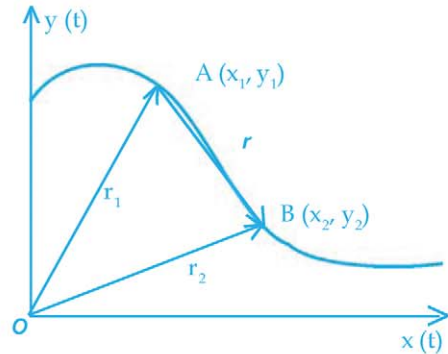
$$\text{sebagai } \vec{v}_t = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Karena  $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j}$ , maka:

$$\vec{v}_t = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d(x\hat{i} + y\hat{j})}{dt} = \frac{dx}{dt}\hat{i} + \frac{dy}{dt}\hat{j}$$

Sedangkan besarnya kecepatan sesaat adalah sebagai berikut.

$$|\vec{v}_t| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$$



**Gambar 1.8 :** Partikel bergerak pada bidang XY.



### CONTOH SOAL

Sebuah partikel bergerak dalam bidang XY sesuai dengan persamaan  $x = 4t^2$  dan  $y = 3t^2$ . Tentukan posisi benda saat  $t = 2$  sekon, kecepatan benda saat  $t = 2$  sekon, besar kecepatan benda saat  $t = 2$  sekon, arah kecepatan benda saat  $t = 2$  sekon, percepatan partikel, arah percepatan, dan besarnya percepatan!

Diketahui :  $x = 4t^2$

$t = 2$  sekon

$y = 3t^2$

Ditanyakan: a.  $\vec{r}$  = ...? c.  $|\vec{v}_t|$  = ...?

b.  $\vec{v}_t$  = ...? d. arah  $\vec{v}_t$  = ...?

- e.  $a = \dots?$
- f. arah  $a = \dots?$
- g.  $|a| = \dots?$

Jawab :

$$r = x\hat{i} + y\hat{j} = 4t^2\hat{i} + 3t^2\hat{j}$$

- a.  $r$  untuk  $t = 2$  s

$$r(2) = 4 \cdot 2^2 \cdot \hat{i} + 3 \cdot 2^2 \cdot \hat{j} = 4 \cdot 4 \cdot \hat{i} + 3 \cdot 4 \cdot \hat{j} = (16\hat{i} + 12\hat{j}) \text{ m}$$

- b.  $v_t = \frac{dr}{dt} = \frac{d(4t^2\hat{i} + 3t^2\hat{j})}{dt} = (8t\hat{i} + 6t\hat{j}) \text{ m/s}$

Jadi,  $v_t$  untuk  $t = 2$  adalah :

$$v_t = 8 \cdot 2 \cdot \hat{i} + 6 \cdot 2 \cdot \hat{j} = (16\hat{i} + 12\hat{j}) \text{ m/s}$$

- c.  $|v_t| = \sqrt{16^2 + 12^2} = \sqrt{400} = 20 \text{ m/s}$

- d. arah  $v_t$  saat  $t = 2$

arah  $v_t$  dapat diketahui dengan besarnya sudut yang dibentuk

oleh  $v_y$  dan  $v_x$  (yaitu  $\alpha$ ) dengan  $\tan \alpha = \left| \frac{v_y}{v_x} \right|$ .

$$\text{Jadi, } \tan \alpha = \frac{12}{16} = \frac{3}{4}. \text{ Sehingga } \alpha = \arctan \frac{3}{4} = 37^\circ$$

- e. Dengan cara penurunan fungsi, percepatan benda didefinisikan sebagai turunan pertama dari kecepatan terhadap waktu. Secara

matematis dapat dinyatakan  $a = \frac{dv}{dt}$ . Jadi, untuk  $v_t = 8t\hat{i} + 6t\hat{j}$

$$\text{diperoleh } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(8t\hat{i} + 6t\hat{j})}{dt} = (8\hat{i} + 6\hat{j}) \text{ m/s}^2$$

- f. Arah  $\alpha$  adalah  $\tan \alpha = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}$ . Jadi,  $\alpha = \arctan \frac{3}{4} = 37^\circ$

Catatan: "Perhatikan bahwa arah  $a$  sama dengan arah  $v_t$ "

- g.  $|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{8^2 + 6^2}$   
 $= \sqrt{100}$   
 $= 10 \text{ m/s}^2$

## F. Analisis Gerak Lurus dengan Vektor

Sebuah mobil yang bergerak dengan percepatan tetap  $a$  pada saat  $t = 0$ , mobil mempunyai kecepatan  $v_0$  dan kedudukan mobil  $r_0$ . Di sini Anda akan mengenal pengaplikasian fungsi integral dalam menganalisis gerak lurus dengan vektor. Jika  $x = \int at^b dt$  dengan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta,

maka integral tersebut hasilnya adalah  $x = \frac{a}{b+1} t^{b+1} + c$  ( $c = \text{konstanta}$ ).

Bagaimana fungsi kedudukan dan kecepatan mobil pada saat  $t$ ?

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$dv = a dt$$

$$v = \int a dt$$

Jika  $a$  konstan, maka  $v = at + c$ . Pada saat  $t = 0$ ,  $v = v_0$ , maka:

$$v_0 = a \times 0 + c \Rightarrow c = v_0$$

$$\text{Jadi, } v = v_0 + at$$

Persamaan di atas merupakan persamaan umum kecepatan gerak dengan percepatan tetap sebesar  $a$ . Bila pada sumbu koordinat  $XY$ ,  $a$  mempunyai komponen-komponen  $a_x$  dan  $a_y$ , yaitu  $a = a_x \hat{i} + a_y \hat{j}$ . Sedangkan  $v_0$  mempunyai komponen-komponen  $v_{0x}$  dan  $v_{0y}$ , yaitu  $v_{0x} = \hat{i} + v_{0y} \hat{j}$ . Sehingga persamaan kecepatan gerak mobil pada bidang  $XY$  adalah sebagai berikut.

$$v = (v_{0x} \hat{i} + v_{0y} \hat{j}) + (a_x \hat{i} + a_y \hat{j}) t$$

$$v = (v_{0x} \hat{i} + a_x t) \hat{i} + (v_{0y} + a_y t) \hat{j}$$

Apabila  $v_x$  dan  $v_y$  berturut-turut adalah komponen vektor kecepatan arah  $x$  dan  $y$  maka:

$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad (\text{persamaan gerak menurut arah } x)$$

$$v_y = v_{0y} + a_y t \quad (\text{persamaan gerak menurut arah } y)$$

Kedudukan mobil  $r$  pada saat  $t$  adalah :

$$v = \frac{dr}{dt}$$

$$dr = v dt$$

$$r = \int v dt \quad (\text{Ingat bahwa } v = v_0 + at)$$

$$r = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 + c$$

Pada saat  $t = 0$ ,  $r = r_0$  maka  $r_0 = c$ , sehingga diperoleh :

$$r = r_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Persamaan di atas merupakan persamaan umum vektor kedudukan benda yang bergerak dengan percepatan tetap pada bidang datar. Bila bidang datarnya XY maka  $r_0$  mempunyai komponen-komponen  $r_{0x}$  pada arah x dan  $r_{0y}$  pada arah y. Sehingga persamaan kedudukan menurut komponen-komponennya adalah :

$$r = (r_{0x} \hat{i} + r_{0y} \hat{j}) + (v_{0x} \hat{i} + v_{0y} \hat{j})t + (a_x \hat{i} + a_y \hat{j})t^2$$

$$r = (r_{0x} + v_{0x} \cdot t + \frac{1}{2} a_x t^2) \hat{i} + (r_{0y} + v_{0y} \cdot t + \frac{1}{2} a_y t^2) \hat{j}$$

Apabila  $r$  mempunyai komponen  $r_x$  menurut arah x dan  $r_y$  menurut arah y maka:

$$r_x = r_{0x} + v_{0x} \cdot t + \frac{1}{2} a_x t^2$$

$$r_y = r_{0y} + v_{0y} \cdot t + \frac{1}{2} a_y t^2$$

Keterangan :

$r_x$  : vektor kedudukan arah sumbu x

$r_y$  : vektor kedudukan arah sumbu y



### CONTOH SOAL

Sebuah mobil bergerak lurus memiliki persamaan percepatan  $a = 9 - t^2$ . Tentukanlah persamaan kecepatan pada saat  $t = 0$  dan  $v = 4$  m/s; persamaan posisi pada saat  $t = 0$  dan  $r = 5$  m; dan posisi saat  $t = 2$  s!

Diketahui :  $a = 9 - t^2$

Ditanyakan: a.  $v = \dots?$

b.  $r = \dots?$

c.  $r_2 = \dots?$



Jawab :

a.  $a = \frac{dv}{dt}$

$$dv = a dt$$

$$v = \int a dt = \int 9 - t^2 dt = 9t - \frac{1}{3}t^3 + c$$

Pada saat  $t = 0$ , dan  $v = 4$  m/s, maka:

$$4 = 9 \times 0 - \frac{1}{3} \times 0 + c \Rightarrow c = 4$$

Jadi persamaan kecepatannya adalah

$$v = 9t - \frac{1}{3}t^3 + 4$$

$$= -\frac{1}{3}t^3 + 9t + 4$$

b.  $v = \frac{dr}{dt}$

$$dr = v dt$$

$$r = \int v dt = \int \left(-\frac{1}{3}t^3 + 9t + 4\right) dt = -\frac{1}{12}t^4 + \frac{9}{2}t^2 + 4t + c$$

pada saat  $t = 0$ ,  $r = 5$  maka :  $c = 5$

$$r = \frac{1}{12}t^4 + \frac{9}{2}t^2 + 4t + 5$$

Jadi, persamaan posisinya adalah

$$r = -\frac{1}{12}t^4 + \frac{9}{2}t^2 + 4t + 5$$

c. Posisi untuk  $t = 2$

$$r = -\frac{1}{12} \cdot 2^4 + 2^2 + 4 \cdot 2 + 5$$

$$= -\frac{16}{12} + 18 + 8 + 5$$

$$= 29 - 1\frac{1}{3}$$

$$= 27\frac{2}{3} \text{ m}$$





## UJI PEMAHAMAN

Kerjakanlah soal-soal latihan di bawah ini pada buku latihan Anda!

1. Sebuah mobil bergerak lurus memiliki persamaan percepatan  $a = 16 - t^2$ . Tentukan persamaan kecepatan pada saat  $t = 0$  dan  $v = 6 \text{ m/s}$ ; kecepatan pada saat  $t = 2 \text{ s}$ ; persamaan posisi pada saat  $t = 0$  dan  $r = 10 \text{ m}$ ; dan posisi mobil pada saat  $t = 5 \text{ s}$ !
2. Sebuah sepeda motor bergerak dengan percepatan  $a = (0,5 \text{ m/s}^2)$ . Pada saat  $t = 0$   $r_0 = (0,0)$  dan  $v_0 = 4 \text{ m/s}$ . Hitunglah kecepatan pada saat  $t = 0$ ; kecepatan pada saat  $t = 25$ ; kedudukan  $r$  pada saat  $t = 0$ ; kedudukan  $r$  pada saat  $t = 2 \text{ s}$ !

## G. Analisis Gerak Melingkar dengan Vektor

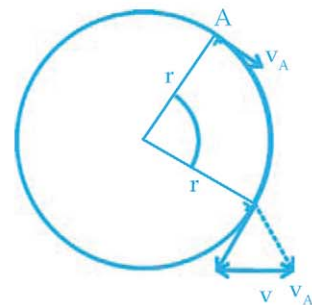
Pada kelas X, Anda telah mempelajari gerak melingkar, bukan? Pembahasan gerak melingkar pada bab ini dititikberatkan pada analisis vektor dari besaran-besaran yang ada pada gerak melingkar. Di sini Anda akan mengenal pengaplikasian fungsi-fungsi turunan dan integral dalam penyelesaian masalah-masalah gerak melingkar. Walaupun pada mata pelajaran matematika mungkin Anda belum mengenal pengoperasian fungsi turunan dan fungsi integral, tetapi pada pembahasan ini disertakan sedikit uraian tentang fungsi-fungsi tersebut. Hal ini agar dapat membantu dalam menyelesaikan masalah-masalah yang terkait.

### 1. Gerak Melingkar Beraturan

Perhatikan Gambar 1.9! Sebuah partikel bergerak melingkar dengan kelajuan tetap. Walaupun kelajuannya tetap, kecepatan partikel ( $v$ ) mengalami perubahan (arahnya). Ilustrasi di samping menggambarkan partikel mula-mula berada di A dan setelah bergerak selama  $\Delta t$  berada pada A'. Perhatikan perubahan vektor  $v$  di A dan di A'. Dalam selang waktu  $\Delta t$  terjadi perubahan kecepatan  $\Delta v = v_A - v_{A'}$  sehingga percepatan rata-

ratanya adalah  $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$  arah vektor  $\bar{a}$  ini

searah dengan vektor  $\Delta v$ .



**Gambar 1.9** Sebuah partikel yang bergerak melingkar.

Untuk  $\Delta t$  yang sangat kecil, arah  $\Delta v$  akan tegak lurus garis singgung lingkaran. Karena arah  $a$  sama dengan arah  $\Delta v$ , maka arah  $a$  ini juga tegak lurus garis singgung serta menuju pusat lingkaran. Percepatan  $a$  ini disebut sebagai percepatan sentripetal, biasa disimbolkan sebagai  $a_s$ . Berapa besarnya  $a_s$  ini?

Perhatikan kedudukan vektor  $v$ ,  $v'$  dan  $\Delta v$  pada Gambar 1.10! Berdasarkan gambar segitiga di samping dengan menarik garis baginya akan diperoleh

$$\left| \frac{\Delta v}{2} \right| = v \cdot \sin \frac{\Delta \theta}{2}.$$

Untuk  $\Delta t$  yang sangat kecil akan diperoleh  $\Delta \theta$  yang sangat kecil pula. Pada kondisi ini nilai  $\sin \frac{\Delta \theta}{2} = \frac{\Delta \theta}{2}$ , sehingga  $|\Delta v| = 2v \frac{\Delta \theta}{2} = v (\Delta \theta)$ .

Sudut  $\theta$  dalam satuan radian (rad).

Perhatikan Gambar 1.11! Panjang busur  $AA'$  dinyatakan sebagai  $\Delta s$  di mana  $\Delta s = r \cdot \Delta \theta$ , atau  $\Delta \theta = \frac{\Delta s}{r}$ . Untuk

$\Delta t$  yang sangat kecil di mana  $\Delta \theta$  juga sangat kecil akan diperoleh  $\Delta s = v \Delta t$ , sehingga:

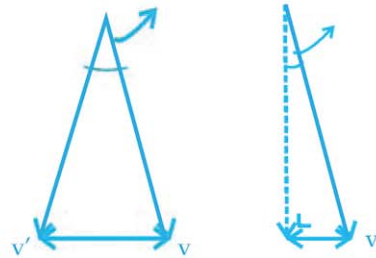
$$|\Delta v| = v \cdot \Delta \theta = v \cdot \frac{\Delta s}{r} = \frac{v \cdot (v \cdot \Delta t)}{r} = \frac{v^2}{r} \cdot \Delta t$$

Karena  $\Delta t$  sangat kecil, maka nilai  $a_s$  dapat dinyatakan sebagai berikut.

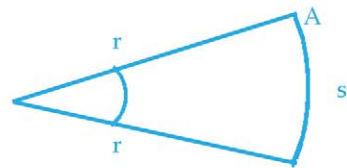
$$a_s = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{|\Delta v|}{\Delta t} = \lim_{t \rightarrow 0} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

Oleh karena itu, besarnya  $a_s$  adalah sebagai berikut.

$$|a_s| = \frac{v^2}{r}$$



Gambar 1.10 Kedudukan vektor  $v$ ,  $v'$ , dan  $\Delta v$ .



Gambar 1.11 Busur  $AA' = \Delta s$ .

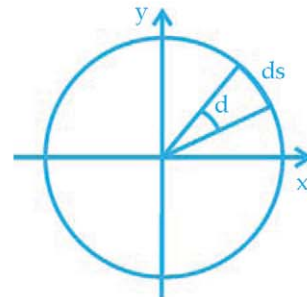
Keterangan

$v$  : kecepatan linear

$r$  : jari-jari lingkaran

Perhatikan Gambar 1.12! Panjang busur  $ds$  dapat dinyatakan sebagai  $ds = r \cdot$

$d\theta$  dari  $v_t = \frac{ds}{dt} = \frac{r d\theta}{dt}$ . Komponen  $\frac{d\theta}{dt}$  ini disebut sebagai kecepatan sudut dan disimbolkan sebagai  $\omega_t$ . Jadi diperoleh  $v_t = r \omega_t$ , dengan  $v_t$  sebagai kecepatan linear sesaat,  $\omega_t$  sebagai kecepatan sudut sesaat, dan  $r$  merupakan jari-jari lingkaran.



**Gambar 1.12** Gerak partikel dengan lintasan  $ds$



### CONTOH SOAL

Sebuah partikel bergerak melingkar dengan jari-jari 0,25 mm serta mengikuti persamaan gerak  $\theta = \frac{2}{3} \pi t$ ,  $\theta$  dalam radian dan  $t$  dalam sekon. Tentukan kecepatan sudut saat  $t = 0,6$  s, kecepatan linier saat  $t = 0,6$  sekon, dan besar kecepatan sentripetalnya!

Diketahui :  $r = 0,25$  m

$$\theta = \frac{2}{3} \pi t$$

Ditanyakan: a.  $\omega_t$  untuk  $t = 0,6$  s = ...?

b.  $v_t$  untuk  $t = 0,6$  s = ...?

c.  $|a_s| = \dots?$

Jawab :

$$\text{a. } \omega_t = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\frac{2}{3}\pi t)}{dt} = \frac{2}{3} \pi \text{ rad/s}$$

$$\text{b. } v_t = r \omega_t = 0,25 \frac{2}{3} \pi = \frac{1}{6} \pi \text{ m/s}$$

$$\text{c. } |a_s| = \frac{v^2}{r} = \frac{\pi^2}{36 \cdot 0,25} = \frac{\pi^2}{9} \text{ m/s}^2$$

#### Catatan :

Pada kasus di atas ternyata nilai  $\omega_t$  dan  $v_t$  tak tergantung  $t$ . Jadi selain tetap, gerak melingkar yang demikian disebut "Gerak Melingkar Beraturan" atau disingkat GMB.

Turunan lintasan garis adalah kecepatan linear, sedang turunan lintasan sudut adalah kecepatan sudut. Jika kecepatan linear diturunkan, maka diperoleh percepatan. Sedangkan turunan kecepatan sudut adalah percepatan sudut.





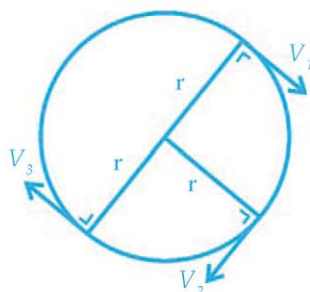
## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!

1. Sebuah benda bergerak melingkar mengikuti persamaan  $\theta = 5t^2 + 2t + 10$ ;  $\theta$  dalam radian dan  $t$  dalam sekon. Jika jari-jari lingkarannya 0,3 m, maka tentukan kecepatan sudut saat  $t = 10$  s, kecepatan linier saat  $t = 10$  s, dan besarnya percepatan sentripetal!
2. Sebuah benda bergerak melingkar dengan persamaan posisi sudut  $\theta = 5t^3 + t^2 + 10$ ,  $\theta$  dalam radian, dan  $t$  dalam sekon. Tentukan kecepatan sudut pada  $t = 2$  sekon dan percepatan sudut pada  $t = 5$  s!

## 2. Gerak Melingkar dengan Kelajuan Tidak Tetap

Perhatikan Gambar 1.13! Sebuah benda bergerak melingkar dengan kecepatan berubah setiap saatnya, di mana  $v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_t$ . Dengan adanya perubahan kecepatan ini, serta merta akan muncul percepatan yang arahnya sama dengan arah  $v$ . Karena arah  $v$  sama dengan arah garis singgung lingkaran (disebut arah tangensial), maka percepatan yang muncul disebut percepatan tangensial ( $a_T$ ). Secara matematis dapat ditulis



**Gambar 1.13** Gambar benda yang bergerak melingkar dengan kecepatan yang berubah.

$a_T = \frac{dv}{dt}$  . Komponen menyatakan perubahan kecepatan sudut atau disebut percepatan sudut, disimbolkan sebagai  $\alpha$  .

$$a_T = r \cdot \alpha$$



## CONTOH SOAL

Sebuah benda bergerak melingkar dan sesuai dengan persamaan kedudukan  $x = 10t + t^2$ . Jika jari-jari lingkaran 0,5 m, maka tentukan kecepatan benda saat  $t = 2$  sekon, percepatan tangensial benda, dan percepatan sudut benda! ( $x$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon)

Diketahui :  $x = 10t + t^2$

$r = 0,5 \text{ m}$

$t = 2 \text{ sekon}$

Ditanyakan: a.  $v_t = \dots?$

b.  $a_T = \dots?$

c.  $\alpha = \dots?$

Jawab :

$$\text{a. } v_t = \frac{dx}{dt} = \frac{d(10t + t^2)}{dt} = 10 + 2t$$

untuk  $t = 2 \text{ sekon}$ , maka  $v_t = 10 + 2 \cdot 2 = 14 \text{ m/s}$

$$\text{b. } a_T = \frac{dv}{dt} = \frac{d(10 + 2t)}{dt} = 2 \text{ m/s}^2$$

$$\text{c. } \alpha = \frac{a_T}{r} = \frac{2}{0,5} = 4 \text{ rad/s}^2$$

### 3. Resultan $a_T$ dan $a_s$

Sekarang Anda telah mengenal dua jenis percepatan yang muncul pada gerak melingkar, yaitu  $a_s$  (percepatan sentripetal) dan  $a_T$  (percepatan tangensial). Pada kenyataannya masing-masing percepatan tersebut tidaklah muncul sendiri-sendiri, melainkan selalu muncul secara simultan. Pada benda yang bergerak melingkar serta merta akan muncul  $a_s$  dan  $a_T$ . Dengan pendekatan vektor, coba kerjakan kegiatan-kegiatan berikut!

#### ● TUGAS



*Kerjakan di dalam buku tugas Anda!*

1. Gambarlah lingkaran dengan jari-jari tertentu, anggap lingkaran ini sebagai lintasan benda yang bergerak melingkar!
2. Tentukan sebuah titik pada lintasan lingkaran (sebut sebagai titik P)!
3. Hubungkan titik P dengan pusat lingkaran (garis potong-potong)!
4. Gambarlah vektor  $a_T$  dan vektor  $a_s$  pada titik P (ingat arah  $a_T$  dan arah  $a_s$ )!
5. Gambarlah vektor  $a$  sebagai resultan dari  $a_T$  dan  $a_s$ !
6. Dengan Teori Pythagoras, tentukan besar vektor  $a$ !





## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!

Sebuah benda bergerak melingkar mengikuti persamaan kedudukan  $x = 20t + 0,5t^2$ ,  $x$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Jika jari-jari lingkarannya 0,5 meter, maka tentukan kecepatan benda saat  $t = 2$  s, percepatan tangensial benda, percepatan sentripetal benda saat  $t = 2$  s, dan resultan percepatan benda!

### 4. Besar Sudut Tempuh ( $\theta_t$ ) dan Panjang Lintasan ( $s_t$ )

Benda yang bergerak melingkar selalu mengalami perubahan kedudukan setiap saatnya. Perhatikan Gambar 1.14!



Gambar 1.14 (a) Benda bergerak dengan kecepatan sudut awal  $\omega_0$  dan (b) Benda bergerak dengan kecepatan sudut  $\omega_t$ .

Benda bergerak melingkar mula-mula dengan kecepatan sudut  $\omega_0$ . Setelah selang  $\Delta t$  kecepatannya menjadi  $\omega_t$  dan telah menempuh sudut  $\theta$ . Berapa besar sudut yang telah ditempuh benda selama selang  $\Delta t$ ? Coba

ingat lagi persamaan  $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ . Berdasarkan persamaan tersebut dapat dituliskan  $d\theta = \omega dt$  ( $d\theta$  merupakan turunan pertama dari  $\theta$ ). Bagaimana cara menentukan fungsi  $\theta$ ? Dalam matematika untuk menentukan suatu fungsi jika diketahui fungsi turunannya dilakukan dengan cara pengintegralan. Misalkan  $\frac{dx}{dt} = at^b$ , dengan  $a$  dan  $b$  konstanta, maka

$dx = d(at^b) dt \Rightarrow x = \int_{t_1}^{t_2} a \cdot t^b dt = \frac{a}{b+1} \cdot t^{(b+1)} \Big|_{t_1}^{t_2}$ . ( $\int$  adalah simbol operasi integral) dengan  $t_1$  dan  $t_2$  batas-batas waktu dalam bergerak melingkar.



## CONTOH SOAL

Sebuah partikel bergerak melingkar dengan jari-jari 0,5 m dan kecepatan sudutnya  $\omega(t) = 5t^3 \text{ rad/s}$ .

a. Hitunglah sudut yang ditempuh oleh partikel dihitung dari awal ( $t = 0$ ) sampai dengan 2 sekon!

b. Kelajuan partikel pada saat  $t = 2$  sekon!

Diketahui :  $r = 0,5 \text{ m}$

$$\omega(t) = 5t^3 \text{ rad/s}$$

Ditanyakan: a.  $\theta$  dari  $t = 0 \text{ s}$  /  $t = 2 \text{ sekon}$

b.  $|v_t|$  pada saat  $t = 2 \text{ sekon}$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } \theta &= \int_0^2 \omega(t) dt = \int_0^2 (5t^3) dt = \left[ \frac{5}{4} t^4 \right]_0^2 \\ &= \frac{5}{4} (2^4 - 0^4) \\ &= \frac{5}{4} (16) \\ &= 20 \text{ rad} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } |v_t| &= r \cdot \omega(t) = 0,5 \cdot 5 \cdot 2^3 \\ &= 0,5 \cdot 40 \\ &= 20 \text{ m/s} \end{aligned}$$

## TUGAS



*Diskusikan masalah di bawah ini bersama teman Anda !*

Tempat latihan berkuda dibuat berbentuk lingkaran. Tempat latihan tersebut lambat laun makin miring. Seperti pinggir piring sisi luar, tampak lebih tinggi daripada sisi dalam. Apa sebabnya? Buatlah kesimpulan dan kumpulkan di meja guru!



*Sumber: Encarta Encyclopedia, 2006.*



## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini pada buku tugas Anda!

1. Sebuah partikel bergerak pada lintasan berupa lingkaran dengan jari-jari 5 m dan kelajuan tetap. Jika frekuensi putarannya 0,2 Hz, maka hitunglah kecepatan sudutnya, kecepatan liniernya, dan percepatan sentripetalnya!
2. Sebuah partikel bergerak melingkar dengan kecepatan sudut  $\omega(t) = 0,5 \pi t \text{ rad/s}$  dan jari-jari lingkarannya 1 meter. Hitunglah kecepatan sudut saat  $t = 5 \text{ s}$ , kecepatan liniernya saat  $t = 5 \text{ s}$ , sudut yang ditempuh setelah partikel bergerak selama 5 s, percepatan sentripetal partikel saat  $t = 5 \text{ s}$ , percepatan tangensial partikel, dan besar resultan percepatan sentripetal dan percepatan tangensialnya pada saat  $t = 5 \text{ s}$ !

## H. Analisis Gerak Parabola dengan Vektor

Perhatikan Gambar 1.15! Seorang penjaga taman dengan sebuah senapan berpeluru obat bius ingin menembak seekor kera yang menggantung di cabang sebuah pohon. Penjaga itu membidik langsung pada kera, tanpa mempertimbangkan bahwa peluru akan mengikuti gerak parabola. Apakah peluru tersebut akan mengenai kera?



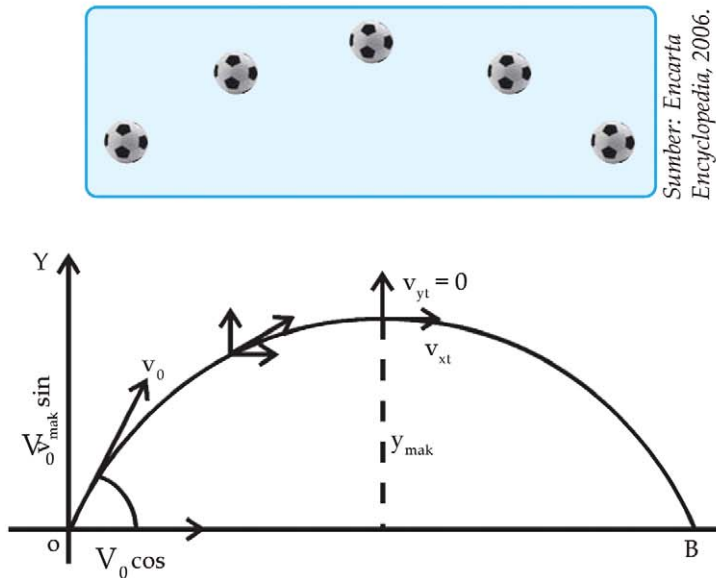
Sumber: Dokumen Haryana.

Gambar 1.15 : Penjaga taman menembak seekor kera dengan peluru obat bius.

Jika kera tetap diam, maka peluru tidak akan mengenainya. Namun, jika kera menjatuhkan diri dari pohon sesaat setelah mendengar senapan menyalak, maka kera tertembak. Mengapa demikian? Lakukan analisis berikut! Lemparkan sebuah bola dengan membentuk sudut sekitar  $30^\circ$



dengan arah mendatar. Mintalah kepada salah satu temanmu untuk mengamatinya. Bagaimana lintasan bola tersebut? Perhatikan Gambar 1.16!



Gambar 1.16 Gerak bola dan analisis gerakannya.

Sebuah bola yang dilemparkan dengan kecepatan awal yang mempunyai komponen vertikal  $y$  dengan arah positif ke atas dan komponen horizontal  $x$  dengan arah positif ke kanan. Misalkan bola diberi kelajuan awal  $v_0$  dengan sudut  $\theta$  terhadap horizontal, maka:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta \text{ dan } v_{0y} = v_0 \sin \theta$$

Untuk komponen gerak menurut sumbu  $X$  pada saat  $t$  adalah:

$$v_{xt} = v_0 \cos \theta \text{ (karena tidak ada percepatan horizontal)}$$

$$x_t = v_{0x} \cdot t = v_0 \cdot \cos \theta \cdot t$$

Sedangkan komponen gerak menurut sumbu  $Y$ , akibat dipengaruhi percepatan gravitasi  $g$ , maka setelah bergerak selama  $t$  sekon diperoleh:

$$v_{yt} = v_0 \sin \theta - gt$$

$$y_t = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2}gt^2$$

Bagaimana tinggi maksimum yang dapat dicapai bola? Pada saat bola berada di titik tertinggi, arah kecepatannya mendatar, maka tidak mempunyai komponen vertikal, yaitu:

$$\begin{aligned}
 v_{yt} &= 0 \text{ sehingga} \\
 v_{yt} &= v_o \sin \theta - gt \\
 0 &= v_o \sin \theta - gt
 \end{aligned}$$

$$t = \frac{v_o \sin \theta}{g}$$

Dengan mensubstitusikan  $t$  ke  $y_t$  maka diperoleh  $y_{\text{mak}}$  yaitu:

$$y_t = v_o \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} gt^2$$

$$y_{\text{mak}} = v_o \sin \theta \cdot \frac{v_o \sin \theta}{g} - \frac{1}{2} g \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right)^2$$

$$y_{\text{mak}} = \frac{v_o^2 \sin^2 \theta}{g} - \frac{1}{2} \frac{v_o^2 \sin^2 \theta}{g}$$

$$y_{\text{mak}} = \frac{1}{2} \frac{v_o^2 \sin^2 \theta}{g}$$

(titik ini merupakan kedudukan tertinggi yang dapat dicapai bola)

Jarak mendatar pada titik tertinggi itu dapat diperoleh dengan mensubstitusikan  $t$  ke  $x_t$  yaitu :

$$x_t = v_{ox} \cdot t = v_o \cdot \cos \theta \cdot t$$

$$x_t = v_o \cos \theta \cdot \left( \frac{v_o \sin \theta}{g} \right)$$

$$x_t = \frac{v_o^2 \cos \theta \sin \theta}{g}$$

$$x_t = \frac{1}{2} \frac{v_o^2 \sin 2\theta}{g}$$

Jadi, bola berada pada titik tertinggi dengan koordinat:

$$(x_t, y_{\text{mak}}) = \left( \frac{1}{2} \frac{v_o^2 \sin 2\theta}{g}, \frac{1}{2} \frac{v_o^2 \sin^2 \theta}{g} \right)$$

Buktikan  $\sin 2\theta = 2 \cos \theta \cdot \sin \theta$ ! Jika ada kesulitan, maka tanyakan kepada guru matematika Anda!



## ● TUGAS



Diskusikan dengan kelompok Anda soal di bawah ini!

Tunjukkan bahwa  $(x_t, y_{\text{mak}}) = \left( \frac{1}{2} \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}, \frac{1}{2} \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{g} \right)$  coba tanyakan kepada guru Anda untuk mengecek jawaban kelompok Anda. Kumpulkan hasil diskusi Anda di meja guru!

Perhatikan kembali Gambar 1.15! Berapakah jarak terjauh yang dapat dicapai oleh bola? Bola jatuh di titik B ini berarti  $y_t = 0$ , maka:

$$y_t = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$0 = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$0 = t (v_0 \sin \theta - \frac{1}{2} g t)$$

$$t = 0 \text{ atau } t = 2 \frac{v_0 \sin \theta}{g}$$

$t = 0$  adalah waktu saat bola dilemparkan.  $t = 2 \frac{v_0 \sin \theta}{g}$  merupakan

waktu yang diperlukan oleh bola untuk mencapai tanah atau jarak terjauh bola. Apabila  $t$  disubstitusikan ke  $x_t = v_0 \cdot \cos \theta \cdot t$  maka :

$$x_t = v_0 \cdot \cos \theta \cdot 2 \frac{v_0 \sin \theta}{g}$$

$$x_t = v_0^2 \frac{2 \sin \theta \cos \theta}{g}$$

$$x_t = v_0^2 \frac{\sin 2\theta}{g}$$

Jadi, titik terjauh bola berada pada koordinat :

$$(x_t, y_t) = \left( v_0^2 \frac{\sin 2\theta}{g}, 0 \right)$$



## CONTOH SOAL

Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan 100 m/s membentuk sudut elevasi  $30^\circ$  terhadap tanah yang mendatar. Bila gesekan dengan udara diabaikan dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah letak dan kecepatan peluru setelah bergerak selama 1 s, tinggi maksimum dan kecepatan saat itu, dan jarak tembakan ketika peluru mencapai tanah!

Diketahui :  $v_0 = 100 \text{ m/s}$

$$\theta = 30^\circ$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanyakan: a.  $(x_t, y_t)$  dan  $v_t$  bila  $t = 1$  sekon = ...?

b.  $y_{\text{mak}} = \dots?$  dan  $v_{\text{mak}} = \dots?$

c.  $x_t$  terjauh = ...?

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } x_t &= v_0 \cos \theta \cdot t \\ &= 100 \cos 30^\circ \cdot t \\ &= 100 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot 1 \\ &= 50 \sqrt{3} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_t &= v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\ &= 100 \sin 30^\circ \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 1^2 \\ &= 100 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1 - 5 \\ &= 50 - 5 \\ &= 45 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, letak peluru setelah 1 sekon adalah  $(50\sqrt{3} \text{ m}, 45 \text{ m})$

Kecepatan arah sumbu X adalah :

$$v_x = v_0 \cos \theta = 100 \cos 30^\circ = 100 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} = 50\sqrt{3} \text{ m/s}$$

Kecepatan arah sumbu Y adalah :

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt = 100 \sin 30^\circ - 10 \times 1 = 100 \times \frac{1}{2} - 10 = 40 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan peluru setelah 1 detik adalah:

$$\begin{aligned} v_t &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(50\sqrt{3})^2 + (40)^2} \\ &= \sqrt{2500 \cdot 3 + 1600} \\ &= \sqrt{9100} = 10 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b. Pada ketinggian maksimum, maka  $v_y = 0$

$$v_y = v_0 \sin \theta - g \cdot t$$

$$0 = 100 \sin 30^\circ - 10 \cdot t$$

$$0 = 100 \cdot \frac{1}{2} - 10 \cdot t \Rightarrow t = \frac{50}{10} \text{ s} = 5 \text{ s}$$

$$\begin{aligned}
 y_{\text{mak}} &= v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \\
 &= 100 \sin 30 \cdot 5 - \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 5^2 \\
 &= 100 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5 - 5 \cdot 25 \\
 &= 125 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi, tinggi peluru maksimum adalah 125 m.

- c. Di tempat terjauh, saat peluru jatuh ke tanah berarti  $y = 0$

$$\begin{aligned}
 y &= v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\
 0 &= 100 \cdot \sin 30 \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\
 0 &= 100 \cdot \frac{1}{2} \cdot t - 5t^2 \\
 0 &= 50t - 5t^2 \\
 0 &= t(50 - 5t)
 \end{aligned}$$

$t = 0$  dan  $t = \frac{50}{5} = 10$  detik ( $t$  yang memenuhi). Jadi, peluru jatuh

ke tanah setelah bergerak selama 10 detik, maka jarak tembakan ketika peluru mencapai tanah adalah:

$$\begin{aligned}
 x_t &= v_0 \cos \theta \cdot t = 100 \cos 30 \cdot 10 \\
 &= 100 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot 10 \\
 &= 500\sqrt{3} \text{ m}
 \end{aligned}$$



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal di bawah ini pada buku tugas Anda!*

1. Sebuah bola golf dipukul dan melesat membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap tanah yang mendatar. Bila kecepatan mula-mula bola golf adalah 50 m/s, maka berapa jauhkah bola golf itu bergerak sampai mencapai tanah?
2. Sebuah bola dilempar ke udara dengan kecepatan awal 50 m/s dan membentuk sudut  $45^\circ$  terhadap bidang horizontal. Carilah waktu total bola berada di udara dan jarak horizontal yang ditempuhnya jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ !
3. Sebuah meriam dimiringkan pada sudut  $45^\circ$ . Meriam tersebut menembakkan sebuah bola dengan kelajuan 300 m/s. Hitunglah ketinggian yang dapat dicapai bola, lama bola berada di udara, dan jangkauan horizontalnya!

*Bandingkan dengan hasil pekerjaan teman Anda!*

## RANGKUMAN

1. Vektor perpindahan posisi partikel dari posisi awal ke posisi akhir.
2. Melalui analisis vektor diketahui  $\mathbf{r}_1 = x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j}$  dan  $\mathbf{r}_2 = x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j}$  sehingga vektor perpindahan dapat dinyatakan dengan  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ .
3. Vektor kecepatan adalah kecepatan rata-rata dalam selang waktu  $\Delta t$  mendekati 0.
4. Vektor percepatan adalah percepatan rata-rata dalam selang waktu  $\Delta t$  mendekati 0.
5. Persamaan gerak lurus dengan vektor dinyatakan

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_{0t} + \frac{1}{2} \mathbf{a} t^2.$$

6. Persamaan gerak parabola dinyatakan dengan

$$y = v_{oy} \cdot t + \frac{1}{2} a_y t^2 \text{ dan } x = v_{ox} \cdot t.$$

## UJI KOMPETENSI

*Kerjakan soal-soal ini di buku tugas Anda!*

1. Guntur mengendarai sepeda motor dengan kecepatan 72 km/jam, tiba-tiba terlihat anak kecil di tengah jalan pada jarak 50 m di depannya. Bila sepeda motor direm dengan perlambatan 5 m/s<sup>2</sup>. Apakah anak tersebut tertabrak? Jelaskan!
2. Sebuah cakram dengan jari-jari R berputar pada sumbu horizontal. Titik P berada di tepi cakram dan titik Q berada pada pertengahan antara pusat dan titik P. Apakah kecepatan sudut di kedua titik tersebut sama? Mengapa?
3. Seorang pemburu burung membidik burung yang berada di cabang sebuah pohon tanpa mempertimbangkan bahwa peluru bergerak dengan lintasan parabola. Apakah peluru tersebut mengenai burung? Mengapa?



4. Seorang operator radar yang tidak dipindah-pindah menentukan bahwa sebuah kapal yang sama berada 10 km di sebelah selatnya. 1 jam kemudian kapal yang sama berada 20 km ditenggaranya. Jika kapal itu bergerak dengan kelajuan konstan dan selalu dalam arah yang sama, berapa kecepatan dalam selang waktu tersebut?
5. Sebuah mobil yang bergerak memenuhi persamaan posisi sebagai berikut:  $\mathbf{r} = 10 t \hat{i} + (t + 2t^2) \hat{j}$ , dalam meter dan  $t$  dalam detik. Tentukan kecepatan mobil saat  $t = 5$  sekon!
6. Persamaan suatu gerak suatu partikel dinyatakan oleh fungsi  $y = 20t - t^2$ ,  $y$  dalam meter dan  $t$  dalam sekon. Hitunglah posisi benda pada saat  $t = 2$  sekon, pecepatan benda saat  $t = 2$  sekon, dan percepatan benda!
7. Sebuah benda bergerak dalam bidang XY dengan mengikuti persamaan :  $x = 10t^2$  dan  $y = 50t - t^2$ . Tentukan posisi benda saat  $t = 3$  sekon, kecepatan benda saat  $t = 3$  sekon, arah kecepatan benda saat  $t = 3$  sekon, besar kecepatan benda saat  $t = 3$  sekon, percepatan benda, dan arah percepatan benda!
8. Sebuah roda berputar dengan kecepatan sudut tetap 50 rad/s. Jika posisi awal sudut adalah 2 rad. Tentukanlah persamaan posisi sudut pada  $t$  dan posisi sudut pada  $t = 5$  sekon!
9. Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan 50 m/s, dengan sudut elevasi  $30^\circ$  di atas tanah yang mendatar,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . Bila gesekan dengan udara diabaikan. Hitunglah letak dan kecepatan peluru setelah bergerak 2 detik, tinggi maksimum dan kecepatan saat itu, dan jarak tembakan ketika mencapai tanah!

### ● TUGAS PROYEK

1. Rancang dan buatlah kipas angin sederhana. Jika mengalami kesulitan, maka tirulah kipas angin yang ada di rumah atau di sekolah Anda!
2. Cobalah kipas angin Anda! Kemudian amati gerakannya! Konsep-konsep fisika apa saja yang berlaku?
3. Mintalah masukan dari teman-teman dan Guru Anda untuk menyempurnakan kipas sederhana ini!!
4. Pikirkan kembali agar kipas angin buatan Anda bernilai ekonomis!





## REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

## BAB 2

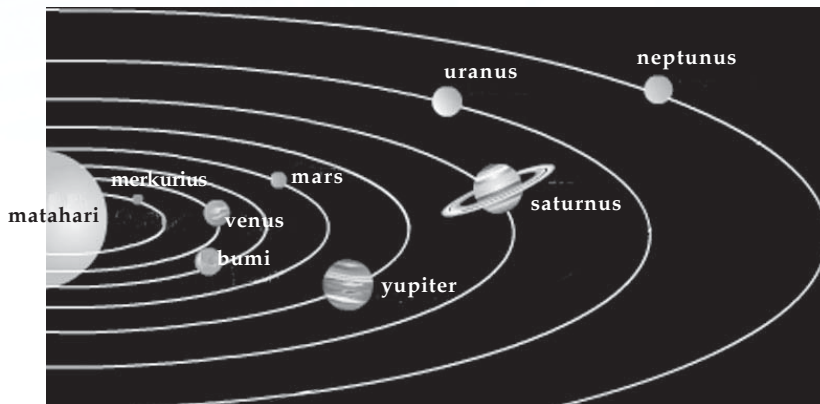
# KETERATURAN GERAK PLANET

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan, dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep gaya dan elastisitas bahan serta dapat menggunakannya dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Anguler
- Elips
- Orbit
- Planet
- Aphelion
- Gravitasi
- Perihelion



Sumber: Encarta Encyclopedia, 2006.

**Gambar 2.1** Tiap planet memiliki orbit teratur dalam mengelilingi matahari.

Coba Anda perhatikan langit pada malam yang cerah. Menakjubkan bukan? Percayakah Anda jika alam semesta memiliki keteraturan? Alam semesta merupakan sebuah sistem maha besar, manusia baru mampu membuka sedikit tabir rahasianya.

Sejak zaman dahulu manusia selalu mencoba membuka tabir alam semesta, baik secara mistis maupun rasional. Sebagai calon pemikir yang rasional, Anda tentu memahami keteraturan sistem ini tidak muncul secara kebetulan, melainkan ada faktor-faktor penyebabnya. Pada bab ini kita akan membahas keteraturan ini berdasarkan hukum-hukum Newton. Bagaimana Sir Issac Newton menganalisis keteraturan ini, mari kita bahas bersama.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini,  
perhatikan peta konsep berikut!



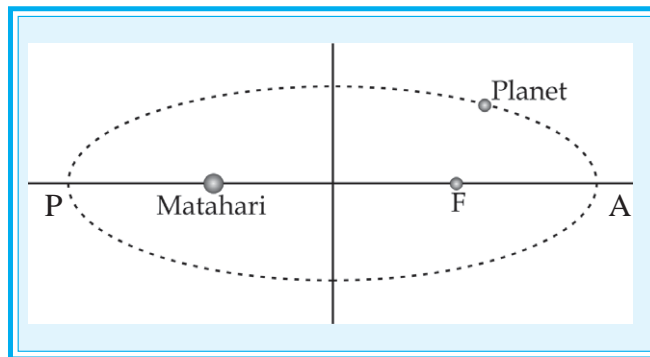
## A. Hukum-Hukum Kepler

Jauh sebelum Newton mempelajari tentang fenomena alam semesta, Kepler telah lebih dahulu menyelidiki gerak planet dalam tata surya. Sebagai seorang ahli matematika, beliau condong mempelajari hal ini dalam cakupan matematik dimana gejala-gejala keteraturan dideteksi dari lintasan dan periodenya.

Kepler menemukan bahwa planet bergerak dengan kelajuan tidak konstan tetapi bergerak lebih cepat ketika dekat dengan matahari dibanding saat jauh dengan matahari. Dengan menggunakan hubungan matematika yang tepat antara periode planet dan jarak rata-rata dari matahari, ia berhasil memberikan kesimpulan dalam hukum-hukum tentang gerak planet yang kemudian dikenal dengan hukum Kepler. Bagaimana bunyi hukum Kepler?

### 1. Hukum I Kepler:

Hukum I Kepler menyatakan bahwa semua planet bergerak dalam orbit elips dengan matahari sebagai salah satu fokusnya. Perhatikan Gambar 2.2 di bawah ini!



**Gambar 2.2** Lintasan planet berbentuk elips.

Pada Gambar 2.2 menunjukkan lintasan elips dari planet dengan matahari berada salah satu titik fokusnya (F). Titik P merupakan titik dimana planet paling dekat dengan matahari dan dinamakan dengan Perihelion. Sedangkan titik A adalah titik terjauh planet dengan matahari yang dinamakan dengan Aphelion.

### Johannes Kepler (1571-1630)



Sumber : *Encarta Enchyclopedi*, 2006.

Johannes Kepler adalah salah satu ilmuwan yang berasal dari Jerman. Beliau seorang ahli astronomi dan matematika. Kepler lahir di Weil der Stadt, Wurttemberg, Jerman pada tanggal 27 Desember 1571 dan meninggal di Regensburg Jerman pada tanggal 15 November 1630. Penemuan Kepler yang sangat terkenal adalah dalam menemukan orbit planet yang sebenarnya. Hukum-hukum mengenai orbit planet ini dikenal dengan sebutan hukum Kepler. Kepler juga sebagai penemu teori cahaya, penyusun katalog bintang, penememu teleskop Kepler, dan penemu simbolisme proportion divina dalam geometri, serta dikenal dengan bapak optika modern.

### ● JENDELA IPTEK ●



#### Musim-Musim Di Bumi

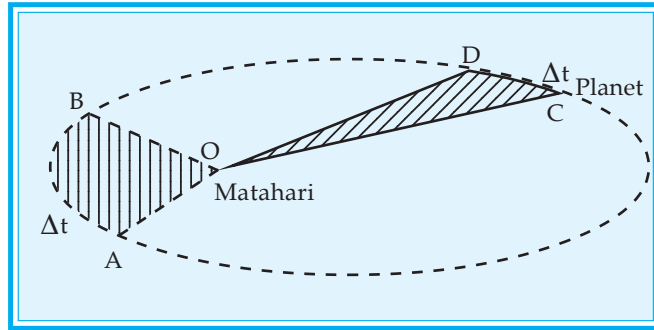
Bumi tidak berputar dengan posisi tegak, tetapi condong membentuk sudut yang selalu tetap. Ketika bumi berada pada salah satu sisi matahari, dan belahan bumi utara (daerah utara ekuator) condong ke arah matahari, maka belahan bumi ini akan menerima sinar matahari lebih banyak, sehingga menyebabkan musim panas. Pada saat yang sama, bumi bagian selatan condong menjauhi matahari, sehingga menyebabkan musim dingin. Jika permukaan bumi tidak menghadap matahari dan belahan bumi utara condong menjauhi matahari, maka terjadilah musim dingin. Tetapi jika bumi berputar mengelilingi matahari dan tidak satupun belahan bumi yang condong ke arah matahari, maka kita mengalami musim semi dan musim gugur.

*Sumber: Planet Bumi, 2005.*



## 2. Hukum II Kepler

Hukum II Kepler menyatakan bahwa garis yang menghubungkan tiap planet ke matahari menyapu luasan yang sama dalam waktu yang sama.



**Gambar 2.3** Luas daerah arsiran OAB sama dengan luas daerah arsiran OCD.

Perhatikan gambar 2.3! Gambar tersebut menjelaskan hukum II Kepler. Pada waktu yang sama yaitu  $\Delta t$ , maka luasan OAB sama dengan luasan OCD. Sebuah planet bergerak lebih cepat ketika lebih dekat dengan matahari dibandingkan ketika saat jauh dengan matahari.

## 3. Hukum III Kepler

Pada hukum III Kepler menyatakan bahwa kuadrat periode tiap planet sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dari matahari. Hukum III Kepler menunjukkan hubungan antara periode dengan jarak rata-rata planet ke matahari. Jika  $r$  adalah jarak rata-rata antarplanet dan matahari, sedangkan  $\Delta T$  adalah periode revolusi planet, maka secara matematis hukum III Kepler dapat ditulis sebagai berikut.

$$T^2 = Cr^3 \text{ atau } \frac{T^2}{r^3} = C$$

Dengan  $C$  adalah konstan, sehingga untuk dua buah planet berlaku:

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

Keterangan :

$T_1$  : periode planet ke-1

$T_2$  : periode planet ke-2

$r_1$  : jarak rata-rata planet ke-1 dengan matahari

$r_2$  : jarak rata-rata planet ke-2 dengan matahari.



### CONTOH SOAL

Periode bumi mengelilingi matahari adalah 365,25 hari dan periode venus mengelilingi matahari adalah 224,7 hari. Bila jarak antara bumi dan matahari adalah 150 juta km, maka tentukan jarak venus ke matahari!

Diketahui :  $T_1 = 365,25$  hari

$T_2 = 224,7$  hari

$r_1 = 150$  juta km

$= 150.000.000 \text{ km} = 150 \times 10^6 \text{ km}.$

Ditanyakan:  $r_2 = \dots?$

Jawab :

Menurut hukum III Kepler

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

$$\frac{(365,25)^2}{(150.000.000)^3} = \frac{(224,7)^2}{r_2^3}$$

$$r_2^3 = \frac{(224,7)^2}{(365,25)^2} (150 \times 10^6)^3$$

$$r_2^3 = \frac{50490,09}{133407,56} (3.375.000 \times 10^{18})$$

$$r_2^3 = 1277319 \times 10^{18}$$

$$r_2 = \sqrt[3]{1277319 \cdot 10^{18}}$$

$$\begin{aligned} r_2 &= 108 \times 10^6 \\ &= 108 \text{ juta km} \end{aligned}$$

Jadi, jarak venus ke matahari adalah 108 juta km.

## JENDELA IPTEK



Tidak ada manusia yang dapat terbang di Bumi, kecuali dengan menggunakan alat bantu. Berbeda dengan di Bulan. Di Bulan para astronot dapat melayang-layang dengan mudahnya seakan-akan astronot tersebut tidak mempunyai bobot. Untuk dapat melayang di suatu tempat tanpa menggunakan alat bantu, maka tempat yang digunakan harus tidak terpengaruh gaya tarik gravitasi.

## TUGAS



Pantai Pangandaran adalah tempat wisata yang terkenal di Jawa Barat. Pada malam hari permukaan pantai akan menjorok ke darat. Gejala ini disebabkan terjadinya pasang naik. Pasang naiknya air laut, terjadi ketika malam tiba seiring munculnya bulan. Pada saat bulan purnama, terjadi pasang naik maksimum. Berdasarkan Hukum-hukum Newton tentang gravitasi, diskusikan gejala ini bersama teman kelompokmu. Susun hipotesa tentang mengapa ini bisa terjadi. Presentasikanlah di depan kelas!



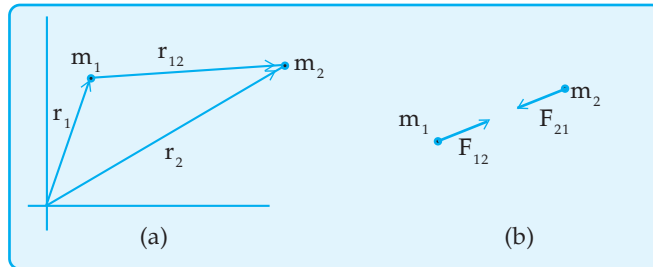
## UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Apakah konsekuensinya suatu planet dalam memenuhi hukum Kepler yang kedua?
2. Kapan kedudukan bumi paling dekat dengan matahari dan kapan pula yang terjauh?
3. Dua planet mempunyai perbandingan periode lintasan 1:3. Berapa perbandingan jaraknya?
4. Bagaimana luas energi kinetik planet selama mengelilingi matahari?

## B. Hukum-Hukum Newton

Coba Anda ingat lagi fenomena pada gerak melingkar! Masih ingatkah Anda tentang gaya sentrifugal? Ya, jika pada suatu benda dipaksa untuk bergerak melingkar oleh gaya sentripetal maka pada benda tersebut timbul reaksi dengan gaya sentrifugal.



**Gambar 2.4** (a) Benda bermassa  $m_1$  di posisi  $r_1$  dan benda kedua bermassa  $m_2$  di posisi  $r_2$  mengarah dari  $m_1$  ke  $m_2$  dan (b) Gaya  $F_{12}$  mengarah dari  $m_1$  ke  $m_2$  dan gaya  $F_{21}$  mengarah dari  $m_2$  ke  $m_1$ .

### JENDELA IPTEK



#### Sir Isaac Newton



Sumber : Encarta Encyclopedia, 2006

Isaac Newton (1642-1727) ahli filsafat, Matematika dan Fisika kelahiran Inggris. Namanya diabadikan sebagai satuan gaya. Dari hukum Kepler, Newton menurunkan hukum gravitasi dan juga menyusun hukum gerak. Pola pikirnya ditulis di buku dengan judul *Philosophy* terkenal *principia*. (judul aslinya *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*).

Pada saat bulan bergerak mengelilingi bumi dengan kecepatan  $v$ , maka akan timbul gaya sentrifugal ( $F_s$ ) yang mendorong bulan ke lintasan luar. Apabila gaya ini dibiarkan bekerja tanpa ada penyeimbangannya, maka secara otomatis semakin lama bulan akan menjauhi bumi. Bagaimana kenyataannya? Ya, ternyata tidak demikian bukan? Mengapa? Hal ini berarti ada gaya lain yang melawan gaya sentrifugal ini agar bulan tetap beredar pada lintasannya. Dengan gaya ini bulan akan ditarik oleh bumi agar tidak keluar lintasan. Gaya ini selanjutnya dikenal dengan gaya gravitasi. Bagaimana Newton menyelidiki tentang gravitasi?



Newton mempostulatkan bahwa tiap benda mengadakan gaya tarik pada benda lain yang sebanding dengan massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pisah antara kedua benda tersebut. Gaya yang diberikan oleh massa  $m_1$  pada  $m_2$  adalah  $F_{12}$  besarnya adalah sebagai berikut.

$$F_{12} = \frac{G m_1 m_2}{r_{12}^2}$$

Keterangan :

$F$  : gaya tarik gravitasi (N)

$m_1$  : massa benda 1 (kg)

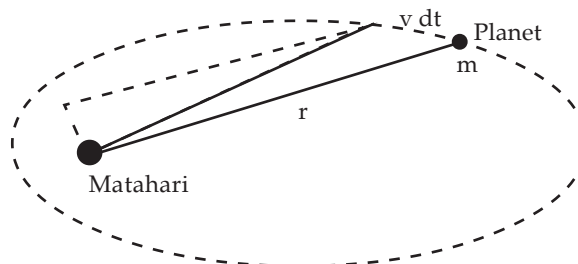
$m_2$  : massa benda 2 (kg)

$r$  : jarak antara kedua benda (cm)

$G$  : konstanta gravitasi umum ( $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ )

Hukum ketiga Newton menyatakan bahwa gaya  $F_{21}$  yang dikerjakan oleh  $m_2$  pada  $m_1$  adalah negatif dari  $F_{12}$ . Artinya  $F_{12}$  adalah sama besarnya dengan  $F_{21}$  tetapi arahnya berlawanan. Planet-planet mengelilingi matahari ditarik oleh sebuah gaya yang besarnya berbeda-beda sesuai

dengan berubahnya  $\frac{1}{r^2}$ , sehingga lintasan planet itu berbentuk elips. Jadi, hukum I Kepler adalah akibat langsung dari hukum gravitasi Newton. Hukum II Kepler diperoleh dari kenyataan bahwa gaya yang diberikan oleh matahari ke planet diarahkan ke matahari. Perhatikan Gambar 2.5!



**Gambar 2.5** Luas yang disapu planet dalam waktu  $dt$  adalah separoh dari jajaran genjang yang terlihat.

Dalam waktu  $dt$  planet bergerak sejauh  $v dt$  dan menyapu separuh luasan jajaran genjang yang dibentuk oleh vektor  $r$  dan  $v dt$ , yaitu  $r \times v dt$ . Jadi, luas  $dA$  yang disapu dalam waktu  $dt$  oleh vektor jejari  $r$  adalah

$dA = \frac{1}{2} |rv dt| = \frac{1}{2m} |rmv dt| = \frac{1}{2m} Ldt$ , dengan  $L = rmv$  merupakan momentum angular planet relatif terhadap matahari.

## TUGAS



Jelaskan secara fisis persamaan  $dA = \frac{1}{2m} \cdot L \cdot dt$ , kemudian bandingkan dengan Hukum II Kepler! (Buka kembali bunyi Hukum II Kepler)

Luasan yang disapu dalam selang waktu tertentu  $dt$  sebanding dengan momentum angular  $L$ . Selama planet bergerak, nilai  $L$  adalah konstan, maka luasan yang disapu dalam suatu selang waktu tertentu  $dt$  adalah sama untuk semua bagian orbit. Hal ini sama dengan yang dikemukakan Kepler dalam Hukum II Kepler.

Sekarang ditinjau dari sebuah planet yang bergerak mengelilingi matahari dengan kelajuan  $v$  dalam orbit lingkaran berjari-jari  $r$ . Karena planet bergerak dalam sebuah lingkaran, maka planet mempunyai percepatan sentripetal.

Dari hukum II Newton tentang gerak diberikan :

$$F = m_p \cdot a$$

Dan berdasarkan hukum gravitasi Newton :

$$F = \frac{GM_m m_p}{r^2},$$

didapatkan :

$$\frac{GM_m m_p}{r^2} = m_p \cdot \frac{v^2}{r}$$
$$v^2 = \frac{G \cdot M_m}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M_m}{r}}$$

Keterangan :

$M_m$  : massa matahari

$m_p$  : massa massa planet

$r$  : jarak rata-rata antara planet dan matahari

$v$  : kecepatan satelit

Jarak yang ditempuh oleh planet adalah sepanjang  $2\pi r$ . Apabila jarak yang ditempuh oleh planet tersebut selama satu periode tertentu, maka kelajuan planet tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

Jika  $v = \frac{2\pi r}{T}$  disubstitusikan ke  $v^2 = \frac{G \cdot M_m}{r}$ , maka akan diperoleh :

$$v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{G \cdot M_m}{r} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_m} r^3$$

Persamaan di atas mirip dengan hukum III Kepler. Persamaan tersebut juga berlaku untuk orbit satelit tiap planet jika massa matahari  $M_m$  diganti dengan massa planet.

### TUGAS

Diskusikan dengan kelompok Anda soal di bawah ini!

Jelaskan persamaan dan perbedaan rumus  $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_m} r^3$ , dengan hukum III Kepler! (Coba tanyakan kepada guru Anda untuk mengecek jawaban kelompok Anda!)



### CONTOH SOAL

1. Hitunglah gaya tarik antara matahari dengan Merkurius, bila massa matahari  $1,99 \times 10^{30}$  kg, massa Merkurius  $3,3 \times 10^{23}$  kg dan jarak Merkurius ke matahari  $57,9 \times 10^9$  m!

Diketahui :  $M_m = 1,99 \times 10^{30}$  kg  
 $m_p = 3,3 \times 10^{23}$  kg  
 $r = 57,9 \times 10^9$  m

Ditanyakan:  $F = \dots?$

Jawab :

$$F = \frac{G m_m m_p}{r^2}$$

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{(6,67 \times 10^{-11}) (1,99 \times 10^{30}) (3,3 \times 10^{23})}{(57,9 \times 10^9)^2} \\
 &= \frac{43,80189 \times 10^{42}}{33,5241 \times 10^{20}} \\
 &= 1,306 \times 10^{22} \text{ N}
 \end{aligned}$$

2. Mars mempunyai bulan dengan periode 460 menit dan jari-jari orbit rata-rata  $9,4 \times 10^6$  m. Berapa massa Mars?

Diketahui :  $T = 460$  menit  $= 460 \times 60$  s

$r = 9,4 \times 10^6$  m

$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Ditanyakan:  $M = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned}
 T^2 &= \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \Rightarrow M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \\
 &= \frac{4\pi^2 (9,4 \times 10^6)^3}{6,67 \times 10^{-11} (460 \times 60)^2} \\
 &= 6,45 \times 10^{23} \text{ kg}
 \end{aligned}$$



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Periode Mars mengelilingi Matahari adalah 687 hari dan periode Uranus mengelilingi Matahari adalah 84 tahun. Bila jarak antara Mars dan Matahari adalah 228 juta km, tentukan jarak Uranus ke Matahari!
2. Jarak antara Matahari ke Venus  $108,2 \times 10^9$  m, bila massa Matahari  $1,99 \times 10^{30}$  kg dan massa Venus  $4,48 \times 10^{24}$  kg, maka tentukanlah gaya tarik antara matahari dan Venus!
3. Hitunglah massa Bumi dari periode bulan  $T = 27,3$  hari, jari-jari orbit rata-rata  $1,496 \times 10^{11}$  m! (bandingkan dengan jawaban teman Anda!)



## ● RANGKUMAN

1. Hukum I Kepler menyatakan bahwa semua planet bergerak dalam orbit elips dengan matahari di salah satu fokusnya.
2. Hukum II Kepler menyatakan garis yang menghubungkan tiap planet ke matahari menyapu luasan yang sama dalam waktu yang sama.
3. Hukum III Kepler menyatakan bahwa kuadrat periode tiap planet sebanding dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet dari matahari.
4. Newton mempostulatkan bahwa tiap benda mengadakan gaya tarik pada benda lain yang sebanding dengan massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pisah antara kedua benda tersebut.

## ● UJI KOMPETENSI

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Merkurius adalah planet yang paling dekat dengan matahari. Merkurius mengelilingi matahari dalam lintasan berbentuk elips.
  - a. Benarkah pernyataan di atas? Tunjukkan data-data yang mendukung jawaban Anda!
  - b. Apabila periode merkurius 88 hari dan periode venus adalah 224,7 hari maka hitunglah jarak merkurius ke matahari bila jarak venus 108 juta km.
  - c. Bagaimana menurut Anda, bumi mengelilingi matahari atau matahari mengelilingi bumi? Jelaskan!
2. Hitunglah gaya tarik antara matahari dan mars, bila masa matahari  $1,99 \times 10^{30}$  kg, massa mars  $6,4 \times 10^{23}$  kg dan jarak mars ke matahari 227,9 juta km!
3. Uranus mempunyai bulan yaitu umbriel, yang jari-jari orbit rata-ratanya  $267 \times 10^6$  m dan periodenya  $3,58 \times 10^5$  sekon. Hitunglah periode bulan uranus lainnya yaitu oberon yang berjari-jari orbit rata-ratanya  $586 \times 10^6$  m dan gunakan nilai G yang diketahui untuk menghitung massa Uranus!
4. Berapa besar kecepatan minimum sebuah benda yang ditembakkan dari permukaan bumi agar benda tersebut mencapai jarak tak terhingga!

5. Apabila diketahui dalam suatu atom hidrogen, elektron dan protonnya terpisah sejauh  $5,3 \times 10^{-11}$  m, maka berapa gaya gravitasi antara dua partikel tersebut?
6. Jika diketahui berat satelit di permukaan bumi sebesar  $W$ , maka berapa gaya gravitasi bumi yang akan menarik satelit ketika satelit mengorbit di dalam satu orbit dengan jari-jari tiga kali jari-jari bumi?
7. Hitung berat orang di bulan jika diketahui berat di bumi sebesar 600 N! (dianggap jari-jari bumi 3,7 kali jari-jari bulan dan massa bumi 80 kali massa bulan).
8. Sebuah satelit mengelilingi bumi pada ketinggian 800 km dari permukaan bumi. Jika gaya gravitasi  $g = 10 \text{ m/s}^2$  dan jari-jari bumi 6,375 km, maka tentukan periode dan kecepatan satelit!
9. Diketahui jari-jari bumi 6,375 km dan percepatan gravitasi bumi  $10 \text{ m/s}^2$ . Jika periode bulan mengelilingi bumi 27,3 hari berapa jarak antara bulan dengan bumi?
10. Sebuah benda di bumi mempunyai berat  $w_1$  dan berat di suatu planet lain sebesar  $w_2$ . Jika massa planet tiga kali massa bumi dan jari-jari planet dua kali jari-jari bumi, maka berapakah perbandingan berat benda di bumi dengan di planet?

### ● TUGAS PROYEK

Menjelang hari raya sering kali kita lihat kembang api mainan berterbangan di udara malam. Dengan kembang api ini, coba Anda rancang sebuah percobaan yang menggambarkan proses penempatan satelit pada wilayah nol gravitasi. Jika rancangan model roket Anda kurang benar, maka kembang api ini tidak akan dapat meluncur ke udara.



### REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

# BAB 3

## ELASTISITAS BAHAN

### Tujuan Pembelajaran

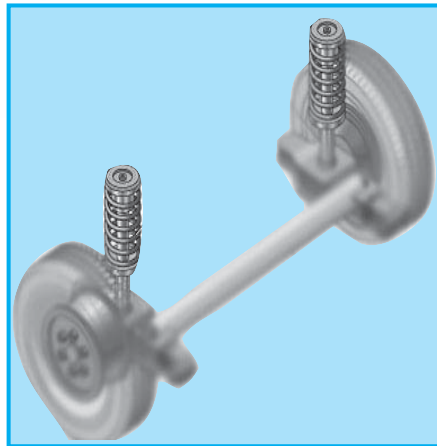
Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep gaya dan elastisitas bahan serta dapat menggunakannya dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Elastisitas
- Tegangan
- Regang jenis
- Modulus Young
- Gaya

Anda ingat saat bermain karet gelang? Ketika Anda menariknya, karet tersebut bertambah panjang. Namun, ketika tarikan tersebut Anda lepaskan karet akan kembali ke bentuk semula. Bandingkan saat Anda bermain plastisin! Saat plastisin Anda tekan kemudian tekanan dihilangkan, maka plastisin akan berubah bentuk atau tidak kembali ke wujud semula. Apa perbedaan antara karet gelang dengan plastisin?

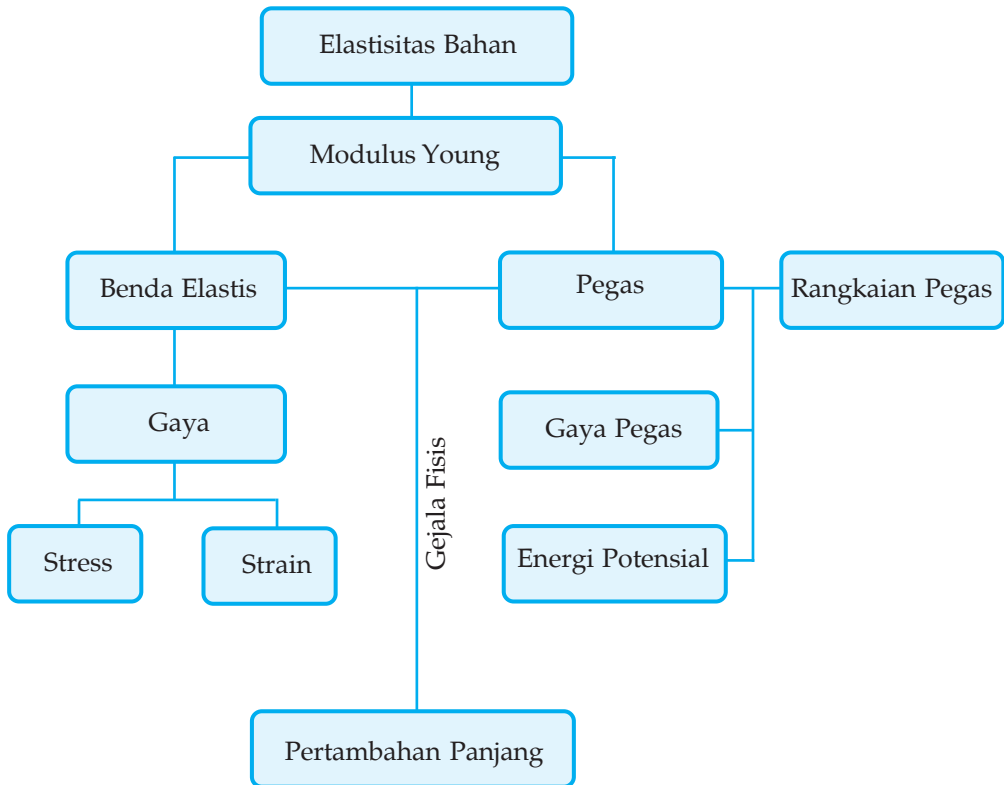
Sifat sebuah benda yang dapat kembali ke bentuk semula dinamakan elastis. Jadi, karet gelang termasuk benda elastis, sedangkan plastisin bukan benda elastis. Anda tentu sudah tidak asing dengan pegas atau biasa disebut sebagai *per*. Coba Anda amati berapa banyak benda yang prinsip kerjanya menggunakan pegas. Dari bolpoint, motor, dan mobil selalu ada bagian yang mengandung pegas. Mengapa pegas banyak digunakan pada peralatan-peralatan tersebut? Apa keuntungan penggunaan pegas? Untuk apa dan mengapa pegas digunakan? Mari kita bahas bersama!



Sumber : Encarta Encyclopedia, 2006.

Gambar 3.1 Per mobil.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini,  
perhatikan peta konsep berikut !





## A. Pengaruh Gaya Terhadap Elastisitas Bahan

Jika suatu benda dikenai gaya, maka apa yang terjadi pada benda tersebut? Ada dua akibat yang mungkin terjadi pada benda yang dikenai gaya, yaitu:

1. Benda mengalami perubahan gerak. Sesuai hukum II Newton, jika

$$\Sigma F \neq 0, \text{ maka akan timbul percepatan } a = \frac{\Sigma F}{m}.$$

2. Benda akan mengalami perubahan bentuk (deformasi).

Berdasarkan kemampuan melakukan perlawanan terhadap perubahan bentuk dan volume, benda-benda di alam dibagi menjadi tiga macam wujud, yaitu benda padat, cair, dan gas. Perhatikan Tabel 3.1 berikut!

**Tabel 3.1 Bentuk dan Sifat Zat**

Tingkat Wujud	Bentuk	Volume
Padat	Tetap	Tetap
Cair	Berubah-ubah	Tetap
Gas	Berubah-ubah	Berubah-ubah

Berdasarkan informasi yang tercantum pada Tabel 3.1, tampak hanya zat padat saja yang dapat mempertahankan bentuk dan volumenya. Bagaimana hubungan ini dengan elastisitas?

Jika suatu benda padat dipengaruhi gaya kemudian bentuknya berubah (misal bertambah panjang), maka partikel-partikel benda tersebut akan melakukan perlawanan terhadap perubahan bentuk. Perlawanan yang ditimbulkan berupa gaya reaksi untuk mempertahankan bentuknya. Gaya ini disebut sebagai gaya elastis. Gaya elastis inilah yang akan mengembalikan benda ke bentuk semula. Untuk lebih memahami tentang pengaruh gaya terhadap elastisitas bahan, lakukanlah tugas berikut!

### TUGAS



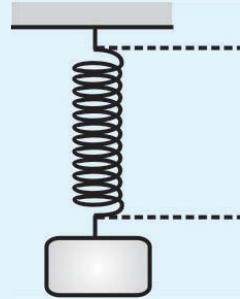
Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok bisa terdiri atas 5 sampai 8 anak. Bersama kelompok Anda, lakukanlah percobaan berikut!

**Tujuan Percobaan :** Menyelidiki sifat elastis benda.

**Alat dan Bahan :** Pegas, lembaran karet, dan beban.

### Langkah Percobaan :

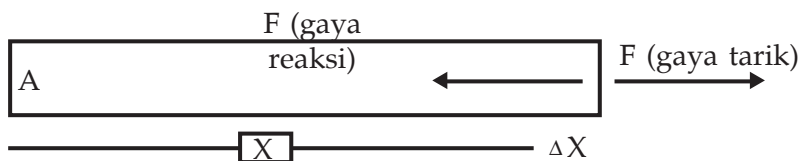
1. Gantungkan pegas secara bebas, seperti gambar di samping!
2. Ukur panjang pegas!
3. Gantungkan beban pada bagian bawah pegas!
4. Ukur panjang pegas!
5. Lepaskan beban dari pegas!
6. Ukur panjang pegas!
7. Ulangi langkah 1 sampai dengan 6 dengan mengganti pegas dengan lembaran karet!
8. Tulislah data percobaan Anda!



Tingkat Wujud	Panjang Awal (cm)	Panjang Saat Ada Beban (cm)	Panjang Setelah Beban Dilepas (cm)
Pegas			
Lembaran Karet			

9. Buatlah kesimpulan!

## B. Modulus Young



**Gambar 3.2** Batang logam yang ditarik dengan gaya  $F$ .

Perhatikan Gambar 3.2! Anda tentu masih ingat dengan gaya elastis. Apabila suatu batang logam homogen dengan panjang  $L$  dan luas penampang  $A$  ditarik dengan gaya  $F$  yang arahnya membujur (memanjang), maka panjang batang logam bertambah sebesar  $\Delta X$ . Pada kedudukan setimbang gaya elastis (gaya reaksi) ke kiri sama besar dengan gaya tarik ke kanan. Besar gaya elastis tiap satuan luas penampang ( $F/A$ ) disebut *tegangan membujur* (stress membujur, simbol  $\sigma$ ). Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Keterangan :

F : besar gaya tekan/tarik (N)

A : luas penampang X (m<sup>2</sup>)

$\sigma$  : tegangan (N/m<sup>2</sup>)

Besar pertambahan panjang logam tiap satuan panjang ( $\Delta X/X$ ) disebut *regang jenis* (pertambahan panjang fraksional, simbol  $\epsilon$ ).

$$\epsilon = \frac{\Delta X}{X}$$

Keterangan :

$\epsilon$  : regangan (tanpa satuan)

$\Delta X$ : pertambahan panjang (m)

X : panjang mula-mula (m)

Perbandingan antara tegangan dengan regang jenis disebut *modulus elastisitas* (modulus Young dengan simbol E). Nilai modulus Young dalam batas-batas tertentu adalah konstan (tetap). Jadi, bila batas elastisitas belum dilampaui, maka tegangan berbanding lurus dengan regang jenis. Secara matematis modulus Young (E) ditulis sebagai berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F/A}{\frac{\Delta X}{X}}} = \frac{FX}{A\Delta X}$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa besar pertambahan panjang batang logam akibat ditarik gaya F yang membujur adalah:

1. berbanding lurus dengan besar gaya tarik (F);
2. berbanding lurus dengan besar panjang batang semula (X);
3. berbanding terbalik dengan luas penampang batang logam (A);
4. bergantung pada jenis bahan batang logam (pada rumus dinyatakan dengan modulus elastis E) berbanding terbalik dengan modulus elastis.

**Tabel 3.2 Modulus Young Beberapa Jenis Bahan.**

Bahan	Modulus Young (Pa)
Alumunium	$7 \times 10^{10}$
Baja	$20 \times 10^{10}$
Besi	$21 \times 10^{10}$
Karet	$0,05 \times 10^{10}$
Kuningan	$9 \times 10^{10}$
Nikel	$21 \times 10^{10}$
Tembaga	$11 \times 10^{10}$
Timah	$1,6 \times 10^{10}$
Beton	$2,3 \times 10^{10}$
Kaca	$5,5 \times 10^{10}$
Wolfram	$41 \times 10^{10}$

*Sumber : Fisika, Kane & Sternheim 1991*



### CONTOH SOAL

Sebatang logam panjangnya 10 m dengan luas penampang 25 mm<sup>2</sup>. Pada saat kawat tersebut menahan beban 500 N, ternyata bertambah panjang 2 cm. Berapakah nilai modulus Youngnya ?

Diketahui :  $X = 10 \text{ m}$

$$A = 25 \text{ mm}^2 = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$F = 500 \text{ N}$$

$$\Delta X = 2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Ditanyakan:  $E = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned}
 E = \frac{\sigma}{\epsilon} &= \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta X}{X}} = \frac{F}{A} \times \frac{X}{\Delta X} = \frac{500 \times 10}{(25 \times 10^{-6}) \times 10^{-2}} \\
 &= 20 \times 10^9 \\
 &= 2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

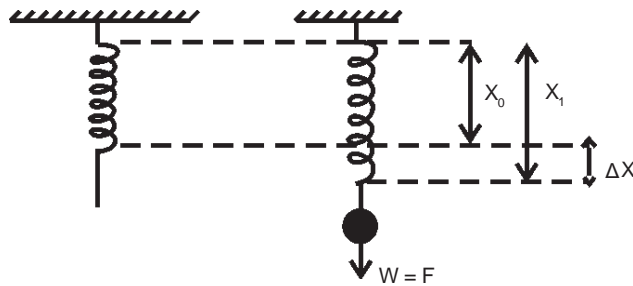


## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!

1. Jelaskan yang dimaksud dengan bahan elastis, bahan tidak elastis, dan modulus Young!
2. Suatu bahan mempunyai modulus young  $10^5 \text{ N/mm}^2$ . Bahan yang panjangnya 3 m tersebut ditarik oleh gaya 1000 N sehingga bertambah panjang 0,60 mm. Berapakah luas penampang bahan tersebut?
3. Gaya sebesar 250 N diberikan kepada suatu bahan yang panjangnya 2 m. Jika bahan bertambah panjang 5 mm dan luas bahan  $2,5 \text{ mm}^2$ , berapakah modulus Young bahan tersebut?

## C. Elastisitas Pegas



Gambar 3.3 Pegas yang ujungnya diberi beban akan meregang.

Perhatikan Gambar 3.3! Gambar 3.3 menunjukkan pegas spiral yang menahan beban sebesar  $F$ . Pegas tersebut akan mengalami pertambahan panjang sebesar  $\Delta X$  ( $\Delta X = X_1 - X_0$ ) selama masih dalam batas-batas elastisitasnya. Pada persamaan  $F = \frac{E \cdot A}{X} \Delta X$ , nilai  $\frac{E \cdot A}{X}$  adalah tetap, maka dapat diturunkan persamaan  $F = k \cdot \Delta X$ . Dengan  $k$  adalah tetapan gaya pegas.



## ● TUGAS



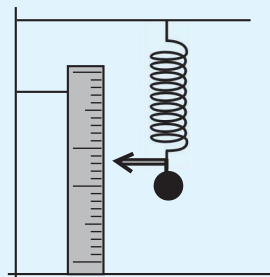
Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok bisa terdiri atas 5 sampai 8 anak. Bersama kelompok Anda, lakukanlah kegiatan berikut.

**Tujuan :** Menyelidiki pengaruh gaya tarik terhadap pertambahan panjang pegas

**Alat dan Bahan :** Pegas, statif, mistar, beban, dan penunjuk.

**Langkah Percobaan :**

1. Rangkailah peralatan seperti pada gambar di samping!
2. Sebelum diberi beban, catatlah kedudukan ujung bawah pegas!
3. Gantungkan sebuah beban di ujung pegas, lalu bacalah skala pada mistar!
4. Ulangilah langkah no. 3 dengan berbagai beban yang semakin berat dan catat skala pada mistar setiap kali penggantian beban!
5. Catatlah hasil pengamatan Anda seperti pada tabel berikut!



No	Gaya Tarik ( $F = mg$ )	Pertambahan Panjang Pegas (m)	Gaya/ Pertambahan Panjang Pegas (N/m)
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

Catatan:

*Pertambahan panjang pegas = panjang pegas akhir – panjang pegas awal*

6. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!



### CONTOH SOAL

Sebuah pegas yang panjangnya 10 cm tergantung bebas. Ketika pegas tersebut menahan beban 10 N, ternyata panjangnya menjadi 10,5 cm. Tentukan tetapan gaya pegas dan panjangnya jika menahan beban 20 N!

Diketahui :  $X_0 = 10 \text{ cm}$

$$F = 10 \text{ N}$$

$$X_1 = 10,5 \text{ cm}$$

Ditanyakan: a.  $k = \dots?$

b.  $X_1$  jika  $F = 20 \text{ N} = \dots?$

Jawab :

$$\text{a. } k = \frac{F}{\Delta X} = \frac{10}{0,5 \times 10^{-2}} = \frac{10^4}{5} = 2 \times 10^3 \text{ N/m}$$

$$\text{b. } \Delta X = \frac{F}{k} = \frac{20}{2 \times 10^3} = 10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, } X_1 &= X_0 + \Delta X = 10 \text{ cm} + 1 \text{ cm} \\ &= 11 \text{ cm} \end{aligned}$$

### TUGAS



Bagilah kelas Anda beberapa kelompok. Tiap kelompok bisa terdiri atas 5 sampai 8 anak. Bersama kelompok Anda, lakukanlah percobaan berikut!

**Tujuan Percobaan :** Menentukan nilai tetapan gaya pegas.

**Alat dan Bahan :** Statif, beban, mistar, dan pegas spiral.

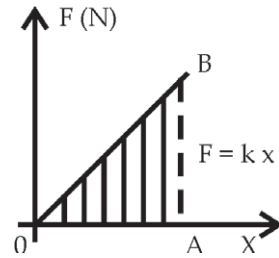
**Langkah Percobaan :**

1. Gantungkan pegas pada statif dan ukur panjang pegas mula-mula ( $X_0$ )!
2. Pasang beban pada ujung pegas dan ukur panjang pegas sekarang ( $X_1$ )!
3. Ulangi langkah 1 dan 2 dengan beban yang berbeda!
4. Tulislah data percobaan di buku tugas Anda!
5. Buatlah kesimpulan!

## D. Energi Potensial Pegas

Ketika melakukan suatu kegiatan, energi sangat kita perlukan. Begitu juga saat meregangkan pegas. Energi yang digunakan untuk meregangkan pegas tersebut berubah menjadi energi potensial pegas. Perhatikan Gambar 3.4!

Besarnya energi yang diberikan pada pegas untuk memperpanjang sebesar  $\Delta X$  sama dengan usaha yang harus dilakukan untuk keperluan itu. Besar usaha yang dilakukan untuk menarik pegas sama dengan luas daerah yang diarsir pada Gambar 3.4!



**Gambar 3.4** grafik antara gaya sebesar  $F$  dan pertambahan pegas  $\Delta X$ .

$$\text{Luas segitiga OAB} = \frac{1}{2} \cdot \text{tinggi} \times \text{alas}$$

$$\text{Luas OAB} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \Delta X$$

$$\text{Luas OAB} = \frac{1}{2} k \cdot \Delta X \cdot \Delta X$$

$$\text{Luas OAB} = \frac{1}{2} k \cdot \Delta X^2$$

Luas segitiga OAB = Usaha = Energi potensial pegas. Jadi, energi potensial pegas adalah  $E_p = \frac{1}{2} k \cdot \Delta X^2$ .



### CONTOH SOAL

1. Sebuah pegas mempunyai tetapan 500 N/m. Berapa energi potensial pegas jika diregangkan bertambah panjang 10 cm?

Diketahui :  $k = 500 \text{ N/m}$

$X = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Ditanyakan:  $E_p = \dots?$

Jawab :

$$E_p = \frac{1}{2} k \cdot \Delta X^2 = \frac{1}{2} \times 500 (0,1)^2 = 250 \times 0,01 = 2,5 \text{ J}$$

2. Panjang awal sebuah pegas 20 cm. Bila benda bermassa 100 g digantung pada ujung pegas, maka panjang pegas menjadi 40 cm. Hitunglah energi potensial pegas bila pegas ditarik 10 cm! ( $g = 10 \text{ ms}^{-2}$ )

Diketahui :  $\Delta X = 40 \text{ cm} - 20 \text{ cm} = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$

$$m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanyakan:  $E_p = \dots?$

Jawab :

$$F = k \times \Delta X$$

$$mg = k \times \Delta X$$

$$0,1 \times 10 = k \times (0,2)^2$$

$$1 = k \times 0,04$$

$$k = \frac{1}{0,04}$$

$$= 25 \text{ N}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \times k \times \Delta X^2 = \frac{1}{2} \times 25 \times (0,1)^2$$

$$= 12,5 \times 0,01$$

$$= 0,125 \text{ J}$$



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Benda yang massanya 1,5 kg jatuh dari ketinggian 8 m di tempat yang percepatan gravitasinya  $10 \text{ m/s}^2$ . Energi benda yang jatuh sama dengan energi pegas yang diregangkan sehingga bertambah 16 cm. Berapa konstanta pegas tersebut?
2. Energi potensial pegas ketika ditekan sehingga memendek sepanjang 7 cm adalah 800 joule. Pegas harus ditekan berapa cm lagi supaya energi potensialnya menjadi 2400 joule
3. Suatu pegas yang konstantanya  $756 \text{ N/m}$  ketika ditekan sampai X mm mempunyai energi potensial sebesar 37,8 N. Jika pegas yang ditekan sampai X mm memiliki energi potensial 125 Joule, berapakah konstanta pegas tersebut?

### Robert Hooke

Robert Hooke menjadi anak yatim saat usianya 13 tahun. Robert Hooke dilahirkan di Pulau Wight. Pada tahun 1655, Hooke membantu Robert Boyle dalam menemukan pompa udara. Hooke terkenal karena hukum elastisitasnya. Hukum ini menyatakan bahwa sejauh mana suatu benda padat itu menjadi tidak karuan bentuknya akan berbanding lurus dengan gaya yang diberlakukannya. Hooke meninggal dunia setelah melakukan ribuan kali eksperimen dalam hidupnya.

## E. Susunan Pegas

Dua buah pegas atau lebih dapat disusun secara seri atau paralel atau gabungan keduanya. Susunan pegas tersebut dapat diganti dengan sebuah pengganti.

### 1. Susunan Seri

Hal-hal yang berkaitan dengan pegas pengganti dari susunan seri adalah sebagai berikut.

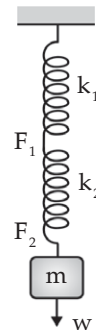
- Gaya yang menarik pegas pengganti dan masing-masing pegas sama besar.  $F_1 = F_2 = F$
- Pertambahan panjang pegas pengganti sama dengan jumlah pertambahan panjang masing-masing pegas.  $x = x_1 + x_2$
- Tetapan pegasnya

$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$  atau secara umum dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots$$

Keterangan :

$k_s$  : konstanta pegas pengganti susunan seri



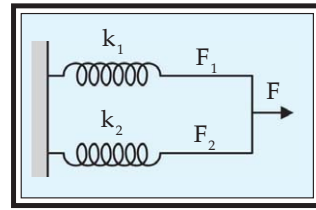
**Gambar 3.5** Susunan pegas secara seri.



## 2. Susunan Paralel

Hal-hal yang berkaitan dengan pegas pengganti dari susunan pegas paralel adalah sebagai berikut.

- Gaya yang menarik pegas pengganti sama dengan jumlah gaya yang menarik masing-masing pegas ( $F = F_1 + F_2$ ).
- Pertambahan panjang pegas pengganti dan masing-masing pegas sama besar ( $x = x_1 = x_2$ ).
- Tetapan penggantinya  $k_p = k_1 + k_2$  atau secara umum ditulis sebagai berikut.



**Gambar 3.6** Susunan pegas secara paralel.

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots$$

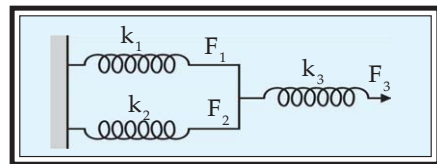
Keterangan :

$k_p$  : konstanta pegas pengganti susunan paralel

## 3. Gabungan Seri dan Paralel

Dan hal-hal yang berkaitan dengan pegas pengganti dari susunan pegas gabungan seri dan paralel adalah sebagai berikut.

- Gaya pengganti ( $F$ ) adalah  $F_1 + F_2 = F$
- Pertambahan panjang pegas ( $x$ )  
 $x_1 = x_2$   
 $x = x_1 + x_3$  atau  $x = x_2 + x_3$
- Tetapan penggantinya ( $k_{tot}$ )



**Gambar 3.7** susunan pegas gabungan seri dan paralel.

$$\frac{1}{k_1 + k_2} + \frac{1}{k_3} = \frac{1}{k_{tot}}$$



### CONTOH SOAL

Enam pegas  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  dan  $k_6$  disusun seperti pada gambar di bawah.  $k_1$  sampai  $k_6$  sejenis masing-masing memiliki konstanta gaya pegas 100 N/m. Jika ujung bawah pegas dibebani 10 kg ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ) hitung berapa cm turunnya ujung bawah pegas tersebut !

Diketahui :  $k_1 - k_6 = 100 \text{ N/m}$

$m = 10 \text{ kg}$

$g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan:  $X = \dots?$

Jawab :

$k_1, k_2$  dan  $k_3$  disusun secara paralel

$$k_{\text{I}} = k_1 + k_2 + k_3 = 100 + 100 + 100 = 300 \text{ N/m}$$

$k_4$  dan  $k_5$  disusun secara paralel

$$k_{\text{II}} = 100 + 100 = 200 \text{ N/m}$$

$k_{\text{I}}, k_{\text{II}}$  dan  $k_6$  disusun secara seri

$$\frac{1}{k_{\text{tot}}} = \frac{1}{k_{\text{I}}} + \frac{1}{k_{\text{II}}} + \frac{1}{k_6} = \frac{1}{300} + \frac{1}{200} + \frac{1}{100}$$

$$= \frac{2}{600} + \frac{3}{600} + \frac{6}{600}$$

$$= \frac{11}{600}$$

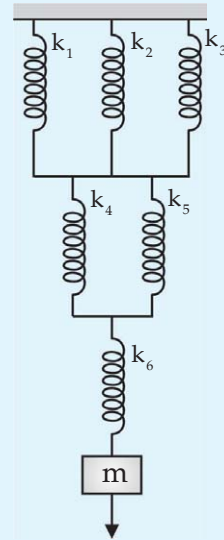
$$k_{\text{tot}} = \frac{600}{11} = 54,55 \text{ N/m}$$

$$F = k \times X$$

$$mg = 54,55 \times X$$

$$10 \times 10 = 54,55 \times X$$

$$100 = 54,55X \Rightarrow X = \frac{100}{54,55} = 1,83 \text{ m}$$



### UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini pada buku tugas Anda!

1. Pada sebuah pegas spiral yang digantung vertikal terdapat beban yang massanya 300 g. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$  dan panjangnya bertambah 20 cm, maka hitunglah tetapan gaya pegasnya!
2. Sebuah pegas yang digantung vertikal memiliki panjang 50 cm. Saat diberi beban 400 g, panjangnya menjadi 60 cm. Kemudian pegas ditarik ke bawah dengan gaya 10 N. Hitung tetapan gaya pegas spiral tersebut dan panjang pegas setelah ditarik ke bawah!

3. Sebuah pegas spiral ditarik dengan gaya  $F$  sehingga panjangnya bertambah 20 cm dan energi potensial elastik selama pegas ditarik adalah 10.000 erg. Hitung tetapan gaya pegas, besar gaya  $F$ , dan energi potensial elastisnya bila panjangnya bertambah 10 cm!

## ● RANGKUMAN

1. Benda elastis adalah benda yang dapat kembali ke bentuk semula apabila gaya yang bekerja dihilangkan.
2. Suatu bahan elastis mempunyai nilai elastis yang terbatas.
3. Modulus Young merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan yang dialami oleh suatu benda.
4. Pertambahan panjang suatu benda elastis sebanding dengan gaya yang bekerja pada benda elastis tersebut.
5. Kemampuan bahan elastis untuk melakukan usaha bila kedudukan setimbangnya terganggu ditunjukkan oleh energi potensial elastis.

## ● TUGAS PROYEK

### Merancang dan Membuat Dinamometer

Rancang dan buatlah dinamometer (alat yang digunakan untuk mengukur gaya). Alat ini menggunakan bahan utama pegas, kalau Anda kesulitan mencari pegas sebagai gantinya adalah karet gelang. Taruhlah dinamometer buatan Anda dengan dinamometer yang ada di laboratorium. Misalnya Anda menimbang benda seberat 1 N dengan dinamometer laboratorium, kemudian benda tersebut Anda timbang kembali dengan dinamometer buatan Anda sambil memberi skala untuk 1 N pada skala dinamometer buatan Anda dan seterusnya sampai batas maksimum elastisitas pegas yang Anda miliki.

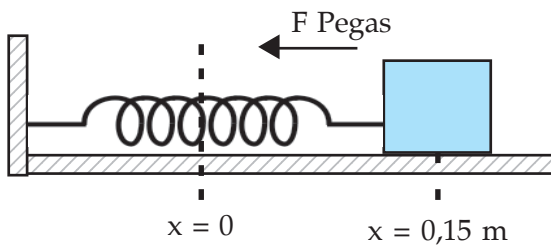
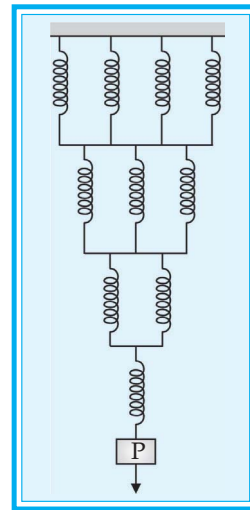
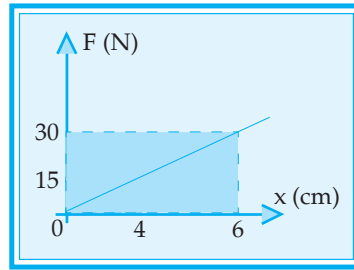
Sekarang cobalah dinamometer buatan Anda untuk mengukur beberapa berat benda, kemudian bandingkan keakuratan dinamometer buatan Anda dengan dinamometer laboratorium. Demonstrasikan dinamometer buatan Anda di depan teman-teman dan guru Anda. Mintalah saran dan masukan untuk penyempurnaan dinamometer buatan Anda. Jika dinilai layak simpanlah dinamometer Anda di laboratorium sekolah.

## UJI KOMPETENSI

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Sebuah alat yang digunakan untuk melatih otot dada terbuat dari pegas. Saat melatih otot dadanya Anton menarik pegas menggunakan dua buah tangannya dengan gaya 40 N dan pegas memanjang sejauh 0,5 m. Anton berkeinginan untuk menambah tarikan pegas tersebut sejauh 1 m dengan cara menambah gaya tarik pada kedua tangannya.
  - a. Apakah Anda setuju dengan cara yang dilakukan Anton tersebut? Jelaskan alasan Anda dengan teori elastisitas!
  - b. Kalau Anda setuju, hitunglah gaya yang diperlukan oleh Anton!
  - c. Berikanlah saran kepada Anton, jenis pegas yang harus digunakan agar tidak membahayakan Anton saat berlatih!
2. Skok breaker sebuah sepeda motor terbuat dari pegas. Amir yang mempunyai massa 60 kg menaiki sepeda motor tersebut sehingga jok sepeda motor tersebut turun 3 cm. Kemudian Agus ikut menaiki sepeda motor tersebut sehingga jok sepeda motor turun menjadi 5 cm. Diperkirakan Agus mempunyai massa 50 kg. Bila percepatan gravitasi bumi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka:
  - a. Benarkah Agus mempunyai massa 50 kg?
  - b. Jika salah, carilah massa Agus tanpa menimbang terlebih dahulu dengan neraca timbang! Dengan teori apa Anda mencari massa Agus?
  - c. Bagaimanakah saran Anda agar skok breaker sepeda motor tersebut tidak cepat rusak?
3. Anda mengukur berat sebuah balok kecil dengan dinamometer. Skala pada dinamometer menunjukkan angka 4 N dan pegas dinamometer tersebut merenggang sejauh 4 cm. Kemudian salah satu dari teman Anda menginformasikan bahwa dinamometer tersebut terbuat dari pegas yang mempunyai tetapan  $100 \text{ N/m}$ .
  - a. Apakah Anda percaya dengan informasi tersebut? Jelaskan jawaban Anda berdasarkan hukum Hooke!
  - b. Hitunglah energi potensial pegas yang ada pada dinamometer tersebut!
  - c. Apakah yang akan Anda lakukan agar dinamometer tersebut tidak cepat rusak?

4. Perhatikan gambar di samping! Berapa energi potensial pegas bila pegas bertambah panjang 2 cm?
5. Panjang awal pegas yang menggantung adalah 20 cm. Bila ujung pegas digantungkan benda bermassa 50 g, maka panjang pegas menjadi 30 cm. Kemudian benda tersebut ditarik sejauh 4 cm. Hitunglah tetapan pegas dan energi potensial pegas!
6. Sepuluh pegas disusun seperti tampak pada gambar di samping! Empat pegas pada rangkaian pertama sejenis dengan konstanta pegas masing-masing 75 N/m, sedangkan enam pegas yang lain dipasang pada rangkaian 3, 2 dan 1 sejenis pula, masing-masing dengan konstanta 50 N/m. Ujung p digantung beban yang massanya 2 kg ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Hitung berapa cm turunnya ujung p!
7. Perhatikan gambar di bawah ini!



Sebuah balok dihubungkan dengan sebuah pegas yang memiliki tetapan  $k$  sebesar  $1.500 \text{ Nm}^{-1}$ . Balok bergerak di atas bidang datar tanpa gesekan. Tentukan usaha yang dilakukan oleh pegas, jika balok bergeser  $0,15 \text{ m}$  dari kedudukan semula!

8. Tiga buah pegas disusun secara seri berturut-turut mempunyai konstanta masing-masing sebesar  $100 \text{ N/m}$ . Apabila pegas tersebut diberi beban  $25 \text{ N}$ , maka hitunglah pertambahan panjang pegas!



9. Dua buah pegas yang tersusun secara paralel berturut-turut mempunyai konstanta sebesar  $100 \text{ N/m}$  dan  $150 \text{ N/m}$ . Apabila pada ujung pegas diberi beban sebesar  $4 \text{ kg}$  dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka berapa pertambahan panjang pegas?
10. Sebuah balok bermassa  $2.400 \text{ g}$  bergerak dengan kecepatan  $50 \text{ cm/s}$  pada sebuah papan luncur yang licin. Pada ujung papan terdapat sebuah pegas dengan konstanta  $k = 60 \text{ N/m}$ . Apabila papan menumbuk pegas, maka hitunglah perubahan panjang maksimum pegas sebagai akibat mendapat tekanan dari balok!



### REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep mana yang lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

# BAB 4

## DINAMIKA GETARAN

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep hubungan gaya dan getaran; serta dapat menggunakannya dalam kehidupan sehari-hari.

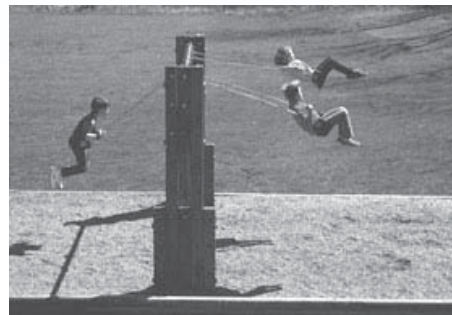
### Kata Kunci

- Getaran harmonik
- Simpangan
- Amplitudo
- Energi Getaran Harmonik

Bermain ayunan selalu dapat menimbulkan keceriaan tersendiri. Hanya sekali dorongan, setelah dilepas akan berayun berulang kali. Dengan jalan menghentak pun kita dapat menambah kecepatan ayunan. Apa rahasianya? Untuk dapat memahaminya mari kita bahas dalam materi bab ini!

Selain pada ayunan, getaran juga bisa terjadi pada pegas. Bagaimana getaran pada pegas? Suatu benda yang bermassa  $m$  digantungkan pada sebuah pegas spiral, kemudian ditarik ke bawah, lalu dilepaskan. Akibat sifat elastis pegas dan sifat lembam benda, maka benda itu akan bergerak naik turun melalui kedudukan setimbang sepanjang lintasan berbentuk garis lurus, yang dinamakan gerak *getaran tunggal*.

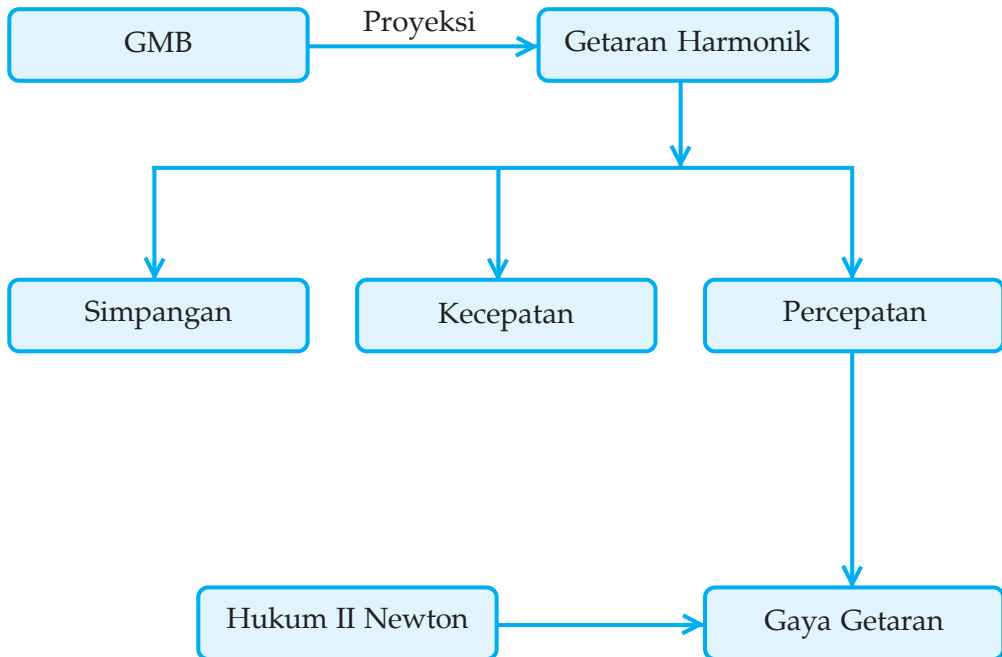
Biasanya arah gerak getaran diambil arah vertikal ke atas ke bawah dan dimulai dari *titik setimbang* dengan arah ke atas. Apa itu titik setimbang? Coba Anda buka pada glosarium!

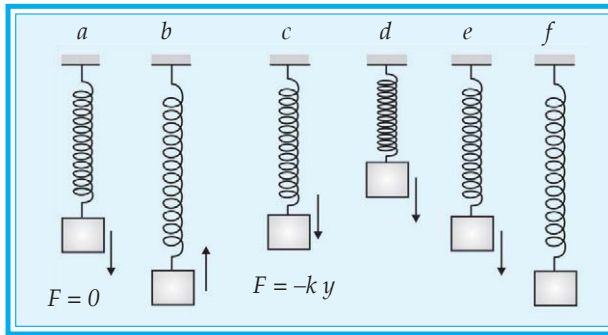


Sumber : CD, Clip Art.

**Gambar 4.1** Ayunan merupakan contoh sederhana getaran harmonik.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini,  
perhatikan peta konsep berikut !





**Gambar 4.2** Kestimbangan pada pegas

Perhatikan Gambar 4.2! Kedudukan a, c, dan e merupakan kedudukan setimbang. Kedudukan b dan f merupakan kedudukan terbawah sedangkan kedudukan d merupakan kedudukan tertinggi.

Saat benda melakukan satu kali getaran maka benda tersebut bergerak dari titik terbawah sampai titik terbawah lagi. Waktu yang digunakan untuk melakukan satu kali getaran dinamakan periode ( $T$ ). Jumlah getaran sempurna yang dilakukan tiap satuan waktu (sekon) disebut frekuensi ( $f$ ) dan dinyatakan dengan satuan hertz (Hz) atau cycles per second (cps). Jika banyaknya getaran adalah  $n$  setelah getaran selama  $t$  sekon, maka dapat dirumuskan:

$$T = \frac{t}{n} \text{ dan } f = \frac{n}{t}$$

Untuk mengamati getaran yang terjadi pada pegas, lakukan kegiatan berikut!

### ● TUGAS



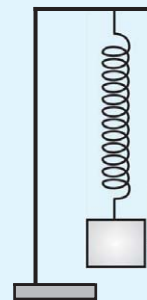
Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok dapat terdiri atas 5 sampai 8 anak. Bersama kelompok Anda, lakukan kegiatan berikut!

**Tujuan Percobaan :** Menentukan periode getaran atau frekuensi getaran.

**Alat dan Bahan :** Pegas, beban, statif, dan stop watch

**Langkah Percobaan :**

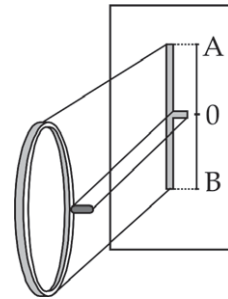
1. Rangkailah peralatan seperti pada gambar di samping!
2. Dalam keadaan setimbang, tariklah beban ke bawah perlahan-lahan kemudian lepaskan!



3. Dengan menggunakan stop watch, catatlah waktu untuk 10 kali getaran!
4. Hitunglah periode dan frekuensi getarannya!
5. Konsultasikanlah kepada guru Anda, apakah sudah benar atau belum hasil kerja kelompok Anda!

## A. Getaran Harmonik Sederhana

Jika sebuah roda disorot sinar, pada layar akan tampak bayangan seperti pada Gambar 4.3. Pada saat roda diputar, maka bayangan engkol akan bergerak naik-turun melalui titik setimbang. Gerakan bayangan engkol pada layar ini merupakan suatu getaran. Berdasarkan peristiwa ini dapat dinyatakan bahwa getaran merupakan proyeksi dari gerak melingkar.



**Gambar 4.3** Roda disorot sinar.

Getaran yang dihasilkan dari proyeksi gerak melingkar beraturan merupakan getaran harmonik sederhana. Anda tentu masih ingat pada gerak melingkar beraturan frekuensinya tetap. Dengan demikian frekuensi pada getaran harmonik juga tetap, dan inilah yang merupakan ciri dari getaran harmonik sederhana. Coba perhatikan lagi Gambar 4.3!

Sebuah benda mula-mula berada di titik setimbang O. Dengan kecepatan awal  $v_0$  benda bergetar harmonik sederhana. Gerakan  $O - A - O - B - O$  disebut sebagai 1 getaran. Gerakan  $O \rightarrow A$ ;  $A \rightarrow O$ ;  $O \rightarrow B$ ; dan  $B \rightarrow O$ , masing-masing merupakan  $\frac{1}{4}$  getaran. Untuk memahami arah-arah  $v$ ,  $a$ , dan  $F$ , perhatikan penjelasan berikut!

1.  $v_0$  adalah kecepatan awal getaran dimana benda bergetar dimulai dari titik setimbang O. Pada gambar 4.3 permulaan getaran dari O menuju A.
2. Pada fase  $\frac{1}{4}$  getaran pertama (dari O ke A) maka:
  - a. Kecepatan  $v_t$  makin kecil dan menjauhi titik setimbang O. Pada saat di A,  $v_t = 0$  menunjukkan benda mulai akan membalik.
  - b. Percepatan getar  $a$  bernilai negatif (arah ke bawah) dan menuju titik setimbang.
  - c. Arah gaya getar  $F$  selalu sama dengan arah percepatan getar  $a$ . Jadi pada fase ini, gaya memiliki arah ke bawah dan menuju titik setimbang.



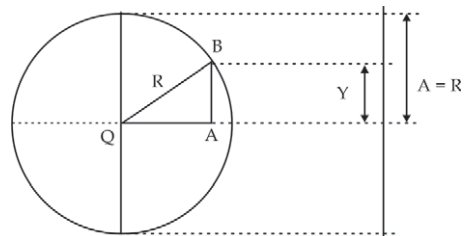
3. Pada fase  $\frac{1}{4}$  getaran kedua (dari A ke O).
  - a. Kecepatan  $v_t$  makin besar dan menuju titik setimbang O. Arah  $v_t$  ke bawah (bernilai negatif).
  - b. Percepatan getar  $a$  bernilai negatif dan menuju titik setimbang.
  - c. Gaya getar  $F$  juga bernilai negatif dan menuju titik setimbang.
4. Pada fase  $\frac{1}{4}$  getaran ketiga (dari O ke B).
  - a. Kecepatan  $v_t$  makin kecil, menjauhi titik setimbang, dan bernilai negatif (arah ke bawah).
  - b. Percepatan getar  $a$  bernilai positif dan menuju titik setimbang.
  - c. Gaya getar  $F$  juga bernilai positif dan menuju titik setimbang.
5. Pada fase  $\frac{1}{4}$  getaran keempat (dari B ke O).
  - a. Kecepatan  $v_t$  makin besar, menuju titik setimbang, dan bernilai positif.
  - b. Percepatan getar  $a$ , bernilai positif dan menuju titik setimbang.
  - c. Gaya getar  $F$  juga bernilai positif dan menuju titik setimbang.

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Arah percepatan getar  $a$  dan arah gaya getar  $F$  selalu menuju titik setimbang. Gaya getar inilah yang menyebabkan benda selalu tertarik ke titik setimbang sehingga terjadi getaran.
2. Kecepatan getar benda  $v_t$ , makin kecil pada saat benda menjauhi titik setimbang. Pada saat ini, arah  $v_t$  berlawanan dengan arah  $a$ .
3. Kecepatan getar benda  $v_t$  makin besar pada saat benda menuju titik setimbang. Pada saat ini arah  $v_t$  searah dengan  $a$ .

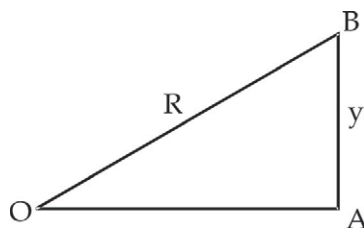
## 1. Simpangan Getaran

Apa yang dimaksud dengan simpangan getaran? Simpangan getaran adalah jarak benda yang sedang bergetar terhadap titik setimbang. Perhatikan Gambar 4.4! Pada bagian kiri adalah sebuah lingkaran yang bergerak melingkar beraturan, sedangkan bagian lain merupakan proyeksinya. Proyeksi ini merupakan contoh getaran harmonik seperti telah dijelaskan di depan. Ketika lingkaran telah berputar sejauh  $\theta^\circ$ , maka pada proyeksinya akan terlihat simpangan ( $y$ ), yang nilainya dapat ditentukan sebagai berikut.



**Gambar 4.4** Lingkaran yang bergerak melingkar beraturan.

Perhatikan Gambar 4.5! Berdasarkan gambar segitiga di samping, nilai  $y = R \sin \theta$ . Coba Anda cermati lagi jari-jari  $R$  pada GMB! Jika diproyeksikan dalam getaran harmonik akan menjadi amplitudo ( $A$ ), sehingga nilai simpangannya adalah sebagai berikut.



Gambar 4.5 Segitiga O A B.

$$y = A \sin \theta$$

Perlu diingat bahwa  $\theta$  adalah sudut yang ditempuh pada GMB, maka  $\theta = \omega t$ , dengan  $\omega$  merupakan besar sudutnya.

$$\begin{aligned} \text{Sehingga: } y &= A \sin \theta \\ &= A \sin \omega t \end{aligned}$$

$$\text{Pada GMB: } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ atau } \omega = 2\pi R$$



### CONTOH SOAL

Sebuah benda bergetar harmonik bermula dari titik setimbang dengan frekuensi 10 Hz dan mempunyai amplitudo 10 cm. Tentukan simpangan getarnya setelah bergerak selama 0,025 sekon!

Diketahui :  $f = 10 \text{ Hz}$

$A = 10 \text{ cm}$

$t = 0,025 \text{ s}$

Ditanyakan:  $y = \dots?$

Jawab :

$$y = A \sin \omega t$$

$$= A \sin 2\pi f t$$

$$= 10 \sin 2\pi \times 10 \times 0,025$$

$$= 10 \sin (0,5 \pi)$$

$$= 10 \times 1$$

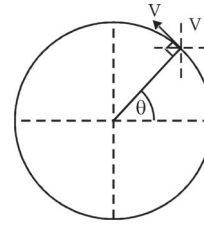
$$= 10 \text{ cm}$$

Jadi, pada saat  $t = 0,025 \text{ s}$  benda berada di puncak getaran karena  $y = A$ .

## 2. Kecepatan Getaran

Perhatikan Gambar 4.6! Proyeksi  $v$  pada sumbu  $y$  biasa disebut sebagai  $v_y$  yang merupakan kecepatan getaran, secara analitis dapat kita jabarkan

$$v_y = v \sin (90 + \theta) \text{ atau } v_y = v \cos \theta$$



**Gambar 4.6** Vektor kecepatan pada GMB.

Pada GMB kecepatan  $v = \omega R$ , atau jika diterapkan pada getaran dimana  $R = A$ , akan diperoleh  $v = \omega A$ . Jadi, kecepatan getaran dapat dituliskan sebagai berikut.

$v_y = \omega A \cos \theta$ . Karena  $\theta = \omega t$ , maka:

$$v_y = \omega A \cos \omega t \text{ atau } v_y = 2\pi f A \cos 2\pi f t$$

Persamaan ini berlaku jika getaran dimulai dari titik setimbang.



### CONTOH SOAL

Sebuah benda bergetar harmonik bermula dari titik setimbang dengan frekuensi 10 Hz dan mempunyai amplitudo 10 cm. Tentukan kecepatan getarnya setelah bergetar selama 0,025 sekon!

Diketahui :  $f = 10 \text{ Hz}$

$A = 10 \text{ cm}$

$t = 0,025 \text{ s}$

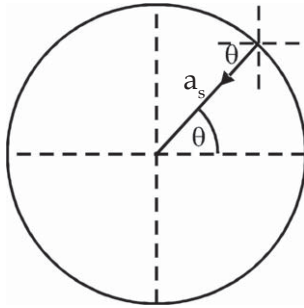
Ditanyakan:  $v_y = \dots?$

Jawab :

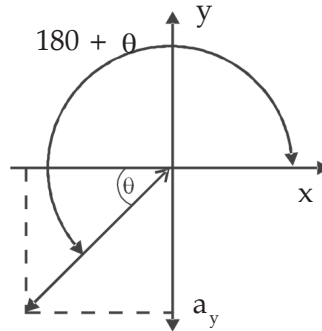
$$\begin{aligned} v_y &= 2\pi f A \cos 2\pi f t \\ &= 2\pi 10 \times 10 \cos (2\pi 10 \times 0,025) \\ &= 200\pi \cos (0,5\pi) \\ &= 200\pi \times 0 \\ &= 0 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

Jadi, pada saat ini kecepatan getarnya adalah 0 (nol). Hal ini menunjukkan benda berada di puncak di mana benda berhenti sesaat untuk bergerak kembali menuju titik setimbang.

### 3. Percepatan Getaran



**Gambar 4.7** Vektor percepatan sentrifugal.



**Gambar 4.8** Vektor uraian  $a_s$ .

Perhatikan Gambar 4.7! Gambar tersebut melukiskan vektor percepatan sentripetal ( $a_s$ ) pada GMB. Bila vektor  $a_s$  ini dilukiskan secara tersendiri, maka akan diperoleh seperti Gambar 4.8. Proyeksi  $a_s$  pada sumbu y biasa disebut dengan  $a_y$  yang merupakan percepatan getaran, secara analitis dapat kita jabarkan sebagai berikut.

$$a_y = a_s \sin (180 - \theta) \text{ atau } a_y = - a_s \sin \theta$$

Coba cermati kembali Gambar 4.8! Arah  $a_s$  selalu menuju pusat lingkaran, sehingga pada gerak harmonik  $a_y$  juga selalu menuju titik setimbang. Karena  $a_s = \omega^2 R$  atau dalam getaran harmonik dimana  $R = A$ , maka  $a_s = \omega^2 A$  sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$a_y = -\omega^2 A \sin \omega t \text{ atau } a_y = -4\pi^2 f^2 A \sin 2\pi f t$$

Persamaan ini juga berlaku untuk getaran yang dimulai dari titik setimbang.



#### CONTOH SOAL

Sebuah benda bergerak harmonik bermula dari titik setimbang dengan frekuensi 10 Hz dan mempunyai amplitudo 10 cm. Tentukan percepatan getarnya setelah bergetar selama 0,025 sekon!

Diketahui :  $f = 10 \text{ Hz}$

$A = 10 \text{ cm}$

$t = 0,025 \text{ s}$

Ditanyakan:  $a_y = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned}a_y &= -4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft) = -4\pi^2 10^2 10 \sin(2\pi 10 \times 0,025) \\&= -4\pi^2 10^2 \times 10 \sin(0 \times 5\pi) \\&= -4\pi^2 \times 10^3 \text{ cm/s}^2 \\&= -4\pi^2 \times 10^1 \\&= -40\pi^2 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

## B. Gaya Getaran

Mengapa benda yang bergetar cenderung kembali ke titik setimbang? Ingat kembali Hukum II Newton ( $F = m a$ ). Pada pembahasan sebelumnya, Anda telah mengenal percepatan getar ( $a_y$ ) yang selalu mengarah ke titik setimbang. Coba pikirkan lagi! Jika pada benda bergetar massa benda diperhitungkan. Apa yang akan muncul jika ada percepatan ( $a_y$ ) dan ada massa ( $m$ ) yang bergetar? Dengan memanfaatkan Hukum II Newton, kita akan menemukan besar gaya  $F$  dimana  $F = m a$ . Hal ini juga terjadi pada kasus getaran harmonik. Besarnya gaya yang menyebabkan benda selalu tertarik ke arah titik setimbang adalah sebagai berikut.

$$F = -m a_y \text{ atau } F = -m \omega^2 A \sin \omega t$$



### CONTOH SOAL

Sebuah pegas spiral dengan gaya pegas  $400\pi^2 \text{ N/m}$  tergantung bebas. Pada bagian bawah pegas digantungi beban 1 kg dan digetarkan dengan amplitudo 10 cm. Tentukan frekuensi getaran, kecepatan getar saat  $t = 0,025$  sekon, simpangan beban saat  $t = 0,025$  sekon, percepatan getar saat  $t = 0,025$  sekon, dan gaya getar saat  $t = 0,025$  sekon!

Diketahui :  $k = 400\pi^2 \text{ N/m}$   $m = 1 \text{ kg}$

$$A = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$$

Ditanyakan: a.  $f = \dots?$

b.  $v = \dots?$  saat  $t = 0,025$  sekon

c.  $y = \dots?$  saat  $t = 0,025$  sekon

d.  $a = \dots?$  saat  $t = 0,025$  sekon

e.  $F = \dots?$  saat  $t = 0,025$  sekon

Jawab :

$$\text{a. } T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \pi \sqrt{\frac{1}{400 \pi^2}} = \frac{1}{10} \text{ sekon}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1/10} = 10 \text{ hertz}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } v &= v_{\text{maks}} \cos (\omega t) \text{ dengan } t = 0,025 \text{ sekon} \\ &= \omega A \cos (\omega t) \\ &= 2 \pi f A \cos (2 \pi f t) \\ &= 2 \pi 10 \times 10^{-1} \cos (2 \pi 10 \times 0,025) \\ &= 2 \pi \cos (0,5 \pi) \\ &= 2 \pi \times 0 = 0 \end{aligned}$$

Jadi, pada saat  $t = 0,025$  sekon.  $v = 0$  m/s

$$\begin{aligned} \text{c. } y &= y_{\text{maks}} \cdot \sin (\omega t) \text{ dengan } t = 0,025 \text{ sekon} \\ y &= A \sin (2 \pi f t) \\ &= 10^{-1} \sin (2 \pi \times 10 \times 0,025) \\ &= 10^{-1} \sin (0,5 \pi) \\ &= 10^{-1} \sin 90^\circ \\ &= 10^{-1} \times 1 = 10^{-1} \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, pada saat  $t = 0,025$  sekon, simpangan benda  $y = 10^{-1} \text{ m} = 10 \text{ cm}$

Catatan : pada saat ini benda berada di  $y = A$

$$\begin{aligned} \text{d. } a &= -a_{\text{maks}} \sin (\omega \cdot t) \\ &= -\omega^2 \cdot A \cdot \sin (\omega \cdot t) \\ &= -4 \pi^2 f^2 A \sin (2 \pi f t) \\ &= -4 \pi \times 10^2 \times 10^{-1} \sin (2 \pi \times 10 \times 0,025) \\ &= -4 \pi \times 10^1 \sin (0,5 \pi) \\ &= -4 \pi \times 10 \sin 90^\circ \\ &= -40 \pi \end{aligned}$$

Jadi, saat  $t = 0,025$  s percepatan getaran  $-40 \pi \text{ m/s}^2$ .

Catatan : nilai  $a$  negatif, berarti arah  $a$  ke bawah dan menuju titik setimbang.

$$\begin{aligned} \text{e. } F &= m a \\ &= 1 \times (-40 \pi) \\ &= -40 \pi \end{aligned}$$

Jadi, pada saat  $t = 0,025$  sekon gaya getarnya  $F = -40 \text{ N}$ .

Catatan : bila  $F$  negatif, berarti arah gaya getar ke bawah dan menuju titik setimbang.



## ● TUGAS



Diskusikan bersama kelompok Anda soal di bawah ini :

Buktikan bahwa  $-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$  mempunyai penyelesaian

$$x = A \cdot \sin \left\{ \left( \sqrt{\frac{k}{m}} \right) t + \theta \right\}$$

Untuk membantu menyelesaikan, coba kalian hubungkan gaya getaran dengan gaya pada pegas yang telah Anda pelajari pada bab elastisitas benda.



## ● UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Jelaskan terjadinya suatu getaran harmonik sederhana dan cara menciptakan getaran pada suatu pegas!
2. Sebuah pegas spiral tergantung menahan beban 1 kg. Pegas akan digetarkan dengan membuat simpangan (beban ditarik ke bawah) 5 cm. Setelah beban dilepas ternyata dalam waktu 1 sekon terjadi 8 getaran. Hitunglah besar frekuensi getaran, periode getarannya, tetapan gaya getarnya, simpangan benda pada saat  $t = 3/16$  s, kecepatan getar pada saat  $t = 3/16$  s, percepatan getar pada saat  $t = 3/16$  s, dan gaya getar pada saat  $t = 3/16$  s!
3. Sebuah benda yang massanya 0,2 kg bergerak harmonik dengan frekuensi 20 Hz dan amplitudonya 0,20 m. Tentukanlah persamaan gerak benda itu jika diketahui bahwa saat  $t = 0$ , simpangannya 0,1 m!
4. Sebuah pegas mempunyai konstanta pegas 1600 N/m digantung vertikal, pada ujungnya diberi beban 1 kg. Apabila beban ditarik ke bawah kemudian dilepas, maka hitunglah frekuensinya!
5. Sebuah pegas bergetar harmonik dan mempunyai persamaan gerak  $x = 0,5 \sin 10 \pi t$ ,  $x$  dalam cm. Hitunglah amplitudo, periode dan frekuensi, kecepatan, serta percepatannya!

## C. Energi pada Getaran Harmonik

Energi yang dimiliki oleh benda yang bergetar harmonik terdiri dari energi kinetik, energi potensial dan energi mekanik. Energi kinetik disebabkan adanya kecepatan, energi potensial disebabkan adanya simpangan atau posisi yang berubah-ubah dan energi mekanik merupakan jumlah energi kinetik dan energi potensial.

### 1. Energi Kinetik ( $E_k$ )

Energi yang dimiliki oleh benda yang bergerak, bila massa benda  $m$  dan kecepatan benda  $v$  maka energi kinetik benda tersebut adalah

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Kecepatan yang dimiliki oleh getaran harmonik adalah  $v = A \omega \cos(\omega t)$ . Sehingga energi kinetik getaran harmonik adalah sebagai berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot [A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)]^2 \text{ atau } E_k = \frac{1}{2} m \cdot (A^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\omega t))$$

Keterangan :

$E_k$  : energi kinetik getaran (J)

$m$  : massa benda (kg)

$\omega$  :  $\frac{2\pi}{T}$  atau  $\omega = 2 \pi f$

$t$  : waktu (s)

$A$  : amplitudo (m)

$\theta$  : sudut awal ( $^\circ$ )

Apabila getaran harmonis terjadi pada pegas maka  $k = m \omega^2$  sehingga energi kinetiknya dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cos^2 \theta$$

### 2. Energi Potensial ( $E_p$ )

Pada saat pegas disimpangkan sejauh  $x$ , maka pegas mempunyai energi potensial.

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$$

Simpangan yang dimiliki oleh getaran harmonik adalah  $x = A \sin(\omega t)$ . Sehingga energi potensial getaran harmonik dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot [A \sin(\omega t)]^2 \text{ atau } E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \sin^2(\omega t)$$

Kita ketahui  $k = m \omega^2$ , maka energi potensial getaran harmonik menjadi seperti berikut.

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \sin^2 \theta$$

Keterangan :

$E_p$  : energi potensial getaran harmonik (J)

$k$  : konstanta getaran (N/m)

### 3. Energi Mekanik ( $E_m$ )

Energi mekanik adalah jumlah energi kinetik dan energi potensial.

$$E_m = E_k + E_p$$

$$E_m = \frac{1}{2} k A^2 \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2} k A^2 \sin^2(\omega t)$$

$$E_m = \frac{1}{2} k A^2 [\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)]$$

Karena  $\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t) = 1$ , maka energi mekanik getaran harmonik dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$



#### CONTOH SOAL

Sebuah benda yang massa 1 kg bergetar harmonik dengan amplitudo 4 m dan frekuensinya 5 Hz. Hitunglah energi kinetik, energi potensial, dan energi mekaniknya pada saat simpangannya 2 m!

Diketahui :  $m = 1 \text{ kg}$                        $A = 4 \text{ m}$   
                      $f = 5 \text{ Hz}$                                $x = 2 \text{ m}$

Ditanyakan: a.  $E_k = \dots?$   
                     b.  $E_p = \dots?$   
                     c.  $E_m = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } E_k &= \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t) = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 [1 - \sin^2(\omega t)] \\ &= \frac{1}{2} m \omega^2 [A^2 - A^2 \sin^2(\omega t)] \\ &= \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - x^2) \\ &= \frac{1}{2} 1 (2\pi \cdot 5)^2 [4^2 - 2^2] \\ &= 0,5 \times 100\pi^2 \times 12 \\ &= 600\pi^2 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } E_p &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 = \frac{1}{2} 1 (2\pi \times 5)^2 \times 2^2 \\ &= 0,5 \times 100\pi^2 \times 4 \\ &= 200\pi^2 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. } E_m &= \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (2\pi \cdot 5)^2 \cdot 4^2 \\ &= 0,5 \cdot 100\pi^2 \cdot 16 \\ &= 800\pi^2 \text{ J} \end{aligned}$$

## ● RANGKUMAN

1. Waktu yang digunakan untuk melakukan satu kali getaran disebut dengan periode.
2. Jumlah getaran sempurna yang dilakukan tiap satuan waktu disebut dengan frekuensi.
3. Simpangan getaran adalah jarak benda yang bergetar terhadap titik setimbang.

4. Nilai simpangan getaran harmonik ( $y$ ) adalah  $y = A \sin \omega t$ .
5. Besar kecepatan getaran adalah  $v_y = v \cos \theta$ . Karena  $v = \omega A$ , maka  $v_y = \omega A \cos \theta$ .
6. Nilai percepatan getaran dapat ditulis  $a_y = -a \sin \theta$  atau  $a_y = -\omega^2 A \sin \omega t$ .
7. Besarnya gaya yang menyebabkan benda selalu tertarik ke titik setimbang adalah  $F = -m \omega A \sin \theta$ .
8. Energi kinetik dalam gerak harmonik mempunyai persamaan 
$$E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \theta.$$
9. Persamaan matematik energi potensial dalam gerak harmonik dapat ditulis dengan  $E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \theta$ .
10. Energi mekanik adalah jumlah energi potensial dan energi mekanik, sehingga persamaan matematis dalam gerak harmonis dinyatakan dengan  $E_m = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \theta$ .

### UJI KOMPETENSI

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Sebuah pegas digantung vertikal pada ujungnya diberi beban. Beban ditarik ke bawah kemudian dilepas.
  - a. Apakah benar bahwa pegas tersebut akan bergerak harmonis?
  - b. Tunjukkan dengan gambar yang dimaksud dengan satu getaran!
  - c. Bila konstanta pegas 1.250 N/m dan bebannya 0,5 kg, maka hitunglah frekuensi dan periode getaran pegas tersebut!
  - d. Bagaimana caranya agar pegas tersebut bergerak harmonis?
2. Sebuah bola pejal massanya 50 g digantungkan pada ujung tali yang panjangnya 40 cm. Bola tersebut ditarik ke kanan dari kedudukan seimbang kemudian dilepas. Bola tersebut berayun dengan frekuensi 2,5 Hz. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah kecepatan dan percepatan pada waktu  $t = 1$  detik dan tentukan caranya agar ayunan sederhana tersebut bergerak harmonis!
3. Pada saat energi kinetik benda yang bergetar selaras sama dengan energi potensialnya, maka tentukan sudut fasenya!

4. Sebuah benda bergetar selaras sederhana pada pegas dengan tetapan gaya  $100 \text{ N/m}$ . Amplitudo getaran tersebut  $20 \text{ cm}$  dan kecepatan maksimumnya  $2 \text{ m/s}$ . Hitunglah massa benda tersebut!
5. Sebuah pegas tergantung tanpa beban panjangnya  $30 \text{ cm}$ . Kemudian digantungi beban  $150 \text{ g}$  sehingga panjang pegas menjadi  $35 \text{ cm}$ . Jika beban ditarik sejauh  $5 \text{ cm}$  dan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah energi potensial elastik pegas!
6. Benda bermassa  $100 \text{ g}$  bergerak harmonik sederhana dengan amplitudo  $10 \text{ cm}$  dan periode  $0,2 \text{ s}$ . Hitunglah besar gaya yang bekerja pada sistem saat simpangannya setengah amplitudo!
7. Sebuah benda bermassa  $0,100 \text{ kg}$  bergerak harmonik di sebuah ujung pegas yang konstanta pegasnya  $200 \text{ N/m}$ . Ketika benda berada  $0,02 \text{ m}$  dari posisi setimbang, kelajuan benda  $0,2 \text{ m/s}$ . Hitunglah energi total benda ketika posisinya  $0,01 \text{ m}$  dari posisi setimbangnya!
8. Sebuah pegas yang digantung vertikal panjangnya  $15 \text{ cm}$ . Saat diregangkan dengan gaya  $0,5 \text{ N}$  panjangnya menjadi  $27 \text{ cm}$ . Berapa panjang pegas apabila diregangkan dengan gaya  $0,6 \text{ N}$ ?
9. Sebuah pegas meregang  $4 \text{ cm}$  saat ditarik gaya  $12 \text{ N}$ . Berapa pertambahan panjang pegas saat ditarik oleh gaya  $6 \text{ N}$ ?
10. Sebuah balok bermassa  $50 \text{ kg}$  digantungkan pada ujung sebuah pegas sehingga bertambah panjang  $10 \text{ cm}$ . Tentukan besar tetapan pegas tersebut!

### TUGAS PROYEK

Untuk mengaplikasikan pengertian yang kalian miliki, cobalah memperbaiki jam dinding rusak. Carilah jam dinding yang prinsip kerjanya berdasarkan pendulum (ayunan sederhana). Selidikilah apakah terjadi perubahan periodenya. Jika ya, bersama temanmu diskusikan apa penyebabnya? Selain dengan memanfaatkan teori yang sudah kalian pahami pada materi getaran ini.



### REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep mana yang lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!



# BAB 5

## USAHA DAN ENERGI

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep usaha, energi dan hukum kekekalan energi mekanik; serta dapat menggunakan dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Usaha
- Energi
- Gerak
- Kinetik
- Potensial
- Mekanik

Perhatikan Gambar 5.1! Raut muka yang berkerut menunjukkan betapa berat beban yang ditopang atlet. Meskipun atlet mengeluarkan energi besar untuk menahan barbel di atas kepalanya, menurut fisika atlet tersebut tidak melakukan usaha. Mengapa bisa begitu? Coba Anda diskusikan jawabannya dengan teman-teman Anda.

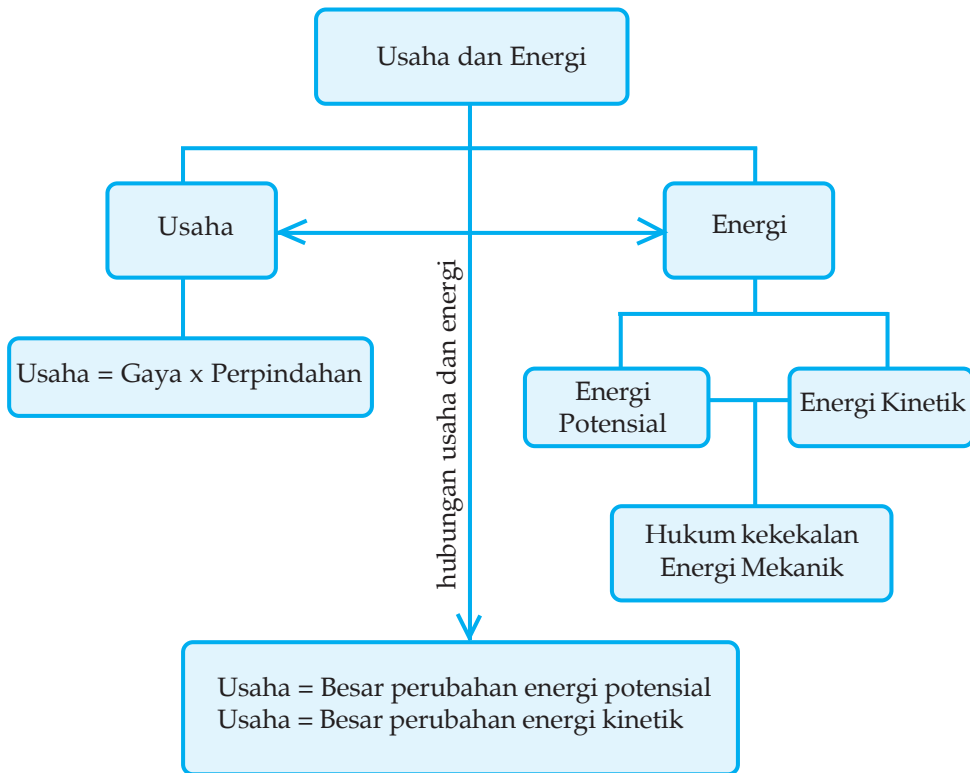
Konsep usaha dan konsep energi merupakan konsep menarik dalam fisika. Banyak soal fisika dapat diselesaikan lebih mudah dengan konsep ini dibandingkan dengan menggunakan hukum Newton. Pada bab ini Anda akan mempelajari konsep usaha dan energi serta aplikasinya dalam berbagai soal fisika. Selain itu, Anda juga akan mempelajari hubungan konsep energi-energi dengan hukum kekekalan energi mekanik. Pada pembahasan energi Anda akan mempelajari berbagai jenis energi seperti energi kinetik dan energi potensial.



Sumber: Jendela Iptek, Gaya dan Gerak.

**Gambar 5.1** Menurut fisika, mengeluarkan energi besar tidak berarti telah melakukan usaha. Tahukah Anda maksudnya?

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini, coba Anda perhatikan peta konsep berikut!



## A. Usaha

Doronglah tembok ruangan kelas dengan kedua tangan Anda! Meskipun Anda bermandi peluh, Anda tidak akan dapat menggeser tembok. Sekarang, doronglah meja belajar Anda. Meja akan tergeser meski energi yang Anda gunakan lebih kecil daripada saat mendorong tembok. Menurut fisika, pada kegiatan pertama Anda dikatakan tidak melakukan usaha. Sedangkan pada kegiatan dua Anda telah melakukan usaha. Apakah usaha itu?



Sumber : Encarta Premium, 2006.

**Gambar 5.2** Jika tembok tidak bergeser, orang yang mendorong tembok dikatakan tidak melakukan usaha.

Usaha dalam fisika didefinisikan sebagai perkalian antara besarnya gaya yang menyebabkan benda berpindah dengan besarnya perpindahan benda yang searah dengan arah gaya tersebut. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

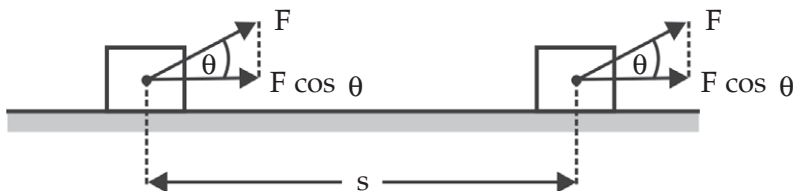
$$W = F \cdot s$$

Keterangan:

W : usaha (J)

F : gaya yang beraksi pada benda (N)

s : jarak perpindahan (m)



**Gambar 5.3** Usaha gaya F yang membentuk sudut dan menyebabkan perpindahan sejauh s.

Perhatikan Gambar 5.3! Sebuah gaya F bekerja pada balok dengan membentuk sudut  $\theta$  terhadap lantai sehingga balok berpindah sejauh s. Karena balok mengalami perpindahan, maka terjadi usaha. Berdasarkan definisi usaha di atas, besarnya usaha yang terjadi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$W = F \cdot s \cos \theta$$



## CONTOH SOAL

1. Gaya sebesar 25 N membentuk sudut  $60^\circ$  pada bidang horizontal bekerja terhadap benda sehingga benda berpindah sejauh 10 m. Hitunglah usaha yang dilakukan gaya tersebut!

Diketahui :  $F = 25 \text{ N}$

$$\theta = 60^\circ$$

$$s = 10 \text{ m}$$

Ditanyakan :  $W = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} W &= F \cos \theta \cdot s \\ &= 25 \cdot \cos 60^\circ \cdot 10 \\ &= 25 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \\ &= 125 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, besarnya usaha yang dilakukan adalah 125 J.

2. Sebuah balok dengan massa 50 kg di atas lantai diangkat sampai ketinggian 8 m. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka tentukan besarnya usaha yang dilakukan pada balok tersebut!

Diketahui :  $m = 50 \text{ kg}$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$s = 8 \text{ m}$$

Ditanyakan :  $W = \dots?$

Jawab :

karena diangkat ke atas, maka  $F = w = m \cdot g$

$$\begin{aligned} W &= F \cdot s \\ &= m \cdot g \cdot s \\ &= 50 \cdot 10 \cdot 8 \\ &= 4.000 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, besarnya usaha yang dilakukan adalah 4.000 J.

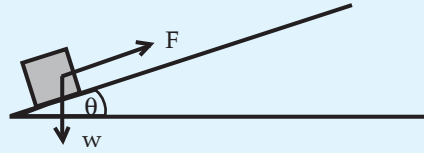
Beberapa gaya dapat dikenakan pada satu benda sekaligus. Bagaimanakah cara menentukan usaha yang dilakukan oleh berbagai gaya? Untuk dapat menentukan usahanya, Anda harus mengetahui besar gaya dan arahnya. Usaha total yang dilakukan oleh beberapa gaya yang bekerja serentak dapat dihitung sebagai hasil kali resultan komponen gaya yang segaris dengan perpindahan dan besarnya perpindahan.

## ● TUGAS



Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok dapat terdiri atas 5 sampai 8 anak. Selesaikanlah permasalahan di bawah ini bersama kelompok Anda!

1. Carilah persamaan matematis yang dapat digunakan untuk mencari besarnya usaha pada benda yang dikenai beberapa gaya sekaligus!
2. Sebuah benda yang ditarik dengan gaya  $F$  terletak pada bidang miring dengan sudut kemiringan  $\theta$ , seperti terlihat pada gambar di samping!
  - a. Bila berat benda tersebut  $w$  dan gaya geseknya  $\mu_k$ , maka uraikanlah gaya yang bekerja pada benda tersebut!
  - b. Bila balok tersebut dapat berpindah sejauh  $s$ , tentukanlah usaha yang dilakukan gaya tersebut!



Jika sudah selesai, maka mintalah kepada guru Anda untuk menunjuk salah satu kelompok agar mempresentasikan hasil kelompoknya di depan kelas. Diskusikan bersama dan tanyakan pada guru Anda jawaban yang benar!



## ● UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Untuk mendorong mobil yang mogok sampai sejauh 7,25 m diperlukan gaya 20.000 N. Berapa energi yang telah digunakan saat mendorong?
2. Tali yang panjangnya 5 m digunakan untuk menarik benda yang terletak di lantai datar. Jika tali condong  $\alpha$ , sehingga  $\sin \alpha = 0,6$  dengan gaya 140 N dan benda bergeser sejauh arah mendatar tali, berapa energi yang diperlukan?
3. Suatu papan miring panjangnya 7,5 m, dengan selisih bagian ujung bawah dan atas adalah 6 m. Jika pada pertengahan bidang terdapat benda yang massanya 12 kg dan bidang licin, berapa energi yang diperlukan benda untuk sampai ke titik bawah papan?

## B. Energi

Di SMP, Anda telah mempelajari bahwa energi merupakan kemampuan untuk melakukan usaha. Anda tentu tahu tentang hukum kekekalan energi. Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan melainkan hanya dapat diubah bentuknya.

Perubahan energi terjadi ketika usaha sedang dilakukan. Misalnya, ketika Anda melakukan usaha dengan mendorong meja hingga meja tersebut bergeser. Pada saat proses usaha sedang berlangsung, sebagian energi kimia yang tersimpan dalam tubuh Anda diubah menjadi energi mekanik. Di sini Anda berfungsi sebagai pengubah energi (konverter energi). Di sini kita akan mempelajari dua jenis energi, yaitu energi kinetik dan energi potensial.

### 1 . Energi Kinetik

Di SMP, Anda sudah mempelajari energi kinetik secara kuantitatif. Sekarang Anda akan mempelajari energi kinetik secara kualitatif, yaitu menurunkan rumus energi kinetik. *Energi kinetik* merupakan energi yang dimiliki oleh benda karena geraknya. Secara umum energi kinetik suatu benda yang memiliki massa  $m$  dan bergerak dengan kecepatan  $v$  dirumuskan oleh persamaan berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

Keterangan:

$E_k$  : energi kinetik (Joule)

$m$  : massa benda (kg)

$v$  : kecepatan benda (m/s)

### TUGAS



Rancanglah sebuah percobaan untuk menyelidiki gaya-gaya yang memengaruhi benda saat dilempar ke atas. Ketika dilemparkan vertikal ke atas, makin lama kecepatan benda makin berkurang berkurang. Perubahan kecepatan ini menunjukkan energi kinetiknya juga berubah. Coba analisa menggunakan percobaanmu dan susun hipotesa tentang hilangnya energi kinetik pada kasus ini. Tulislah hasilnya di buku tugas dan kumpulkan di meja guru!





## UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!*

1. Dua buah kelereng yang terbuat dari kaca dan kayu melaju dengan kelajuan yang sama. Kelereng manakah yang mempunyai energi kinetik lebih besar?
2. Benda yang massanya 700 gram dipukul dengan gaya 140 N sehingga bergerak dengan kelajuan 3,5 m/s. Berapa jarak yang mampu ditempuh?
3. Karena pengaruh gaya 17,5 N, maka sebuah benda dapat bergerak sejauh 40 cm. Berapa energi kinetik yang dimiliki benda?
4. Benda dari 800 g dipukul dengan gaya 512 N sehingga berpindah sejauh 50 cm. Berapa besar kelajuannya?

## 2. Energi Potensial

Energi potensial diartikan sebagai energi yang dimiliki benda karena keadaan atau kedudukan (posisinya). Misalnya, energi pegas (per), energi ketapel, energi busur, dan energi air terjun. Selain itu, energi potensial juga dapat diartikan sebagai energi yang tersimpan dalam suatu benda. Misalnya energi kimia dan energi listrik. Contoh energi kimia adalah energi minyak bumi dan energi nuklir.

Disini kita akan mempelajari energi potensial gravitasi. Apakah energi potensial gravitasi itu? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, lakukan tugas berikut!

### TUGAS



Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok dapat terdiri atas 5 sampai 8 anak. Sekarang, pergilah ke kebun sekolah atau kebun buah yang ada di sekitar Anda. Amatilah buah-buahan yang masih terdapat pada tangkainya. Energi apakah yang terdapat pada buah yang masih di tangkainya? Apa saja yang memengaruhi besarnya energi tersebut? Jika perlu lakukan percobaan sederhana untuk membuktikan perkiraanmu. Tulislah hasilnya di buku tugas dan kumpulkan di meja guru!

Sebuah benda dengan massa ( $m$ ) dipengaruhi oleh percepatan gravitasi bumi ( $g$ ), sehingga berat benda adalah ( $w = mg$ ). Bila benda berada pada ketinggian  $h$ , maka usaha yang dilakukan benda pada ketinggian tersebut adalah  $W = F \cdot s = mgh$ . Saat usaha dilakukan pada benda, berarti benda diberi energi. Energi suatu benda karena kedudukannya dinamakan energi potensial. Bila energi potensial dilambangkan dengan  $E_p$ , maka persamaan matematisnya adalah sebagai berikut.

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

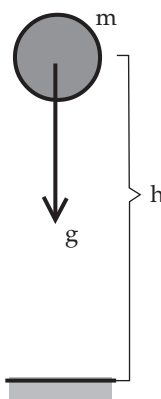
Keterangan :

$m$  : massa benda (kg)

$g$  : kecepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

$h$  : ketinggian benda (m)

$E_p$  : energi potensial ( $kg \cdot m/s^2$ ) atau Joule



**Gambar 5.3** Benda yang memiliki energi potensial karena kedudukannya.



### CONTOH SOAL

1. Seekor burung terbang dengan kelajuan 25 m/s. Bila massa burung tersebut adalah 200 gram, maka hitunglah energi kinetik yang dimiliki burung?

Diketahui :  $v = 25 \text{ m/s}$

$$m = 200 \text{ g} = 0,2 \text{ kg}$$

Ditanyakan :  $E_k = \dots ?$

Jawab :

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot 25^2$$

$$= 62,5 \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik yang dimiliki burung sebesar 62,5 J.

2. Sebuah bola bermassa 0,5 kg dilempar vertikal ke atas hingga mencapai ketinggian 20 m. Bila  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , hitunglah energi potensial benda pada ketinggian tersebut!

Diketahui :  $m = 0,5 \text{ kg}$   
 $h = 20 \text{ m}$   
 $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanyakan :  $E_p = \dots ?$

Jawab :

$$\begin{aligned} E_p &= m g h \\ &= 0,5 \cdot 10 \cdot 20 \\ &= 100 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi, energi potensial yang dimiliki benda sebesar 100 J.



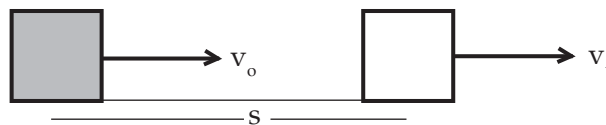
### UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!

1. Sebuah benda dari 1,75 kg jatuh dari ketinggian 6 m. Berapa energi kinetik benda saat menghantam tanah?
2. Dari ketinggian 12 m sebuah benda yang massanya 500 gram jatuh bebas. Berapa kalajuan benda saat tingginya hanya tinggal 2 m?
3. Benda yang massanya 0,25 kg dilepaskan vertikal ke atas dan kembali ke pelempar lagi setelah 12 sekon. Berapa energi kinetik benda setelah bergerak 9 sekon?
4. Dengan sudut kecondongan  $45^\circ$  sebutir peluru yang massanya 100 g ditembakkan dengan energi kinetik awal 10.000 joule. Berapa besar energi kinetik peluru saat di puncak lintasan?

## C. Hubungan Usaha dan Energi

Misalnya sebuah balok yang mempunyai massa  $m$  bergerak dengan kecepatan awal  $v_o$ . Karena pengaruh gaya  $F$ , maka balok setelah  $t$  detik kecepatannya menjadi  $v_t$  dan berpindah sejauh  $s$ .



Gambar 5.4 Balok yang dipindahkan.

Perhatikan Gambar 5.4! Apabila gaya yang diberikan kepada balok besarnya tetap, maka persamaan yang berlaku adalah sebagai berikut.

$$v_t = v_o + at, \text{ maka } a = \frac{v_t - v_o}{t}$$

$$s = v_o \cdot t + \frac{1}{2} at^2$$

$$s = v_o \cdot t + \frac{1}{2} \left( \frac{v_t - v_o}{t} \right) t^2$$

$$s = v_o \cdot t + \frac{1}{2} v_t \cdot t - \frac{1}{2} v_o \cdot t$$

$$s = \frac{1}{2} (v_t + v_o) t$$

Usaha yang dilakukan oleh gaya F adalah :

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot s$$

$$W = m \cdot \left( \frac{v_t - v_o}{t} \right) \cdot \frac{1}{2} (v_t + v_o) t$$

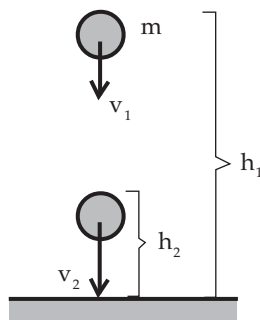
$$W = \frac{1}{2} m (v_t - v_o) (v_t + v_o)$$

$$W = \frac{1}{2} m (v_t^2 - v_o^2)$$

$$W = \frac{1}{2} m v_t^2 - \frac{1}{2} m v_o^2$$

Persamaan di atas merupakan hubungan antara usaha dengan energi kinetik. Hubungan tersebut secara fisis dikatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya sama dengan perubahan energi kinetik benda.

Bagaimanakah hubungan antara usaha dan energi potensial? Perhatikan Gambar 5.5! Misalnya benda bermassa  $m$  dijatuhkan dari ketinggian  $h_1$ . Beberapa saat kemudian benda tersebut sampai pada ketinggian  $h_2$ . Ini berarti benda telah melakukan usaha. Usaha merupakan perkalian antara gaya dan perpindahan. Gaya yang bekerja di sini adalah gaya berat ( $w$ ) yaitu  $m \cdot g$ . Jadi, secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.



**Gambar 5.5** Benda yang dijatuhkan dari ketinggian  $h_1$ .

$$\begin{aligned}
 W &= mg(h_1 - h_2) \\
 &= mgh_1 - mgh_2 \\
 &= E_{p1} - E_{p2} \\
 &= (E_{p1} - E_{p2})
 \end{aligned}$$

$$W = \Delta E_p$$

Dengan  $\Delta E_p$  merupakan perubahan energi potensial gravitasi. Besarnya energi potensial gravitasi sama dengan energi potensial akhir dikurangi energi potensial mula-mula ( $\Delta E_p = E_{p \text{ akhir}} - E_{p \text{ awal}}$ ). Persamaan ini menyatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya gravitasi sama dengan minus perubahan energi potensial gravitasi.

### TUGAS



Anda telah mempelajari hubungan usaha dan energi. Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok dapat terdiri atas 5 sampai 8 anak. Sekarang diskusikan kembali hubungan antara usaha dan energi. Tambahkan juga bahan mengenai energi mekanik dan hubungannya dengan usaha. Mintalah kepada guru Anda untuk menunjuk salah satu kelompok agar mempresentasikan hasil diskusinya di depan kelas. Setelah diskusi selesai, buatlah kesimpulan dan kumpulkan di meja guru!



### CONTOH SOAL

1. Diketahui sebuah benda yang mempunyai massa 10 kg dan kelajuan tetap 8 m/s bergerak pada garis lurus. Jika pada benda tersebut diberikan gaya 20 N searah dengan perpindahannya dan dihilangkan setelah benda menempuh jarak 5 m, maka hitunglah pertambahan energi kinetik akibat gaya tersebut!

$$\begin{array}{ll}
 \text{Diketahui} & : m = 10 \text{ kg} \qquad \qquad \qquad F = 20 \text{ N} \\
 & \qquad \qquad \qquad v_1 = 8 \text{ m/s} \qquad \qquad \qquad s = 5 \text{ m}
 \end{array}$$

Ditanyakan :  $\Delta E_k = \dots ?$

Jawab :

$$E_{k1} = \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 8^2 = 320 \text{ J}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{20}{10} = 2 \text{ m/s}^2$$

$$v_2^2 = v_1^2 + 2a \cdot s = 8^2 + 2 \cdot 2 \cdot 5 = 84 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$E_{k2} = \frac{1}{2} m v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 84 = 420 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= E_{k2} - E_{k1} \\ \Delta E_k &= 420 - 320 \\ &= 100 \text{ J} \end{aligned}$$

2. Sebuah benda bermassa 8 kg mula-mula diam, kemudian bergerak lurus dengan percepatan 6 m/s<sup>2</sup>. Berapakah usaha yang diubah menjadi energi kinetik selama 2 sekon?

Diketahui :  $m = 8 \text{ kg}$   
 $t = 2 \text{ sekon}$

$a = 6 \text{ m/s}^2$   
 $v_o = 0$

Ditanyakan :  $W = \dots ?$

Jawab :

$$\begin{aligned} v_t &= v_o + a \cdot t \\ &= 0 + 6 \text{ m/s}^2 \cdot 2 \text{ s} \\ &= 12 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} m v_t^2 - \frac{1}{2} m v_o^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 12^2 - \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 0 \\ &= 576 \text{ J} \end{aligned}$$



### UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!

1. Dalam waktu 14 sekon kelajuan sebuah benda berubah tetap dari 2 m/s menjadi 36 km/jam. Berapa panjang lintasan yang telah dilewati?
2. Setelah bergerak selama 18 sekon kecepatan sebuah benda berubah dari 3 m/s menjadi 11 m/s. Jika massa benda 0,75 kg, berapa usaha yang telah dilakukan?
3. Dengan percepatan 2 m/s<sup>2</sup> benda yang massanya 4 kg yang semula diam bergerak lurus dipercepat beraturan. Berapa usaha yang mampu diubah menjadi energi gerak selama 5 sekon?



## D. Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Sebuah benda yang dilempar ke atas akan memiliki energi potensial dan energi kinetik. Energi potensial dimiliki karena ketinggiannya, sedangkan energi kinetik karena geraknya. Makin tinggi benda tersebut terlempar ke atas, makin besar energi potensialnya. Namun, makin kecil energi kinetiknya. Pada ketinggian maksimal, benda mempunyai energi potensial tertinggi dan energi kinetik terendah.

Saat benda jatuh, makin berkurang ketinggiannya makin kecil energi potensialnya, sedangkan energi kinetiknya makin besar. Ketika benda mencapai titik terendah, energi potensialnya terkecil dan energi kinetiknya terbesar. Mengapa demikian?

Perhatikan Gambar 5.6! Ketika sebuah bola berada pada ketinggian  $h$ , maka energi potensial di titik A adalah  $E_{pA} = m \cdot g \cdot h$ ,

sedangkan energi kinetiknya  $E_{kA} = \frac{1}{2}mv^2$ .

Karena  $v = 0$ , maka  $E_{kA} = 0$ . Jumlah antara energi potensial di titik A dan energi kinetik di titik A sama dengan energi mekanik. Besarnya energi mekanik adalah:

$$\begin{aligned} E_{mA} &= E_{pA} + E_{kA} \\ &= mgh + 0 \\ &= mgh \end{aligned}$$

Misalnya, dalam waktu  $t$  sekon bola jatuh sejauh  $h_1$  (titik B), sehingga jarak bola dari tanah adalah  $h - h_1$ . Energi potensial bola di titik B adalah  $E_{pB} = mg(h - h_1)$ . Dari titik A ke titik B ternyata energi potensialnya berkurang sebesar  $mg h_1$ . Sedangkan, energi kinetik saat bola di B adalah sebagai berikut. Saat bola jatuh setinggi  $h_1$ , bola bergerak berubah beraturan dengan kecepatan awal nol.

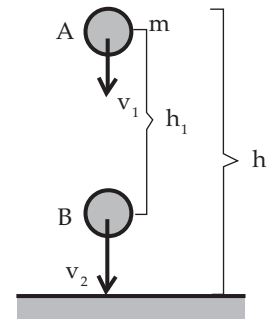
$$h_1 = v_0 \cdot t + \frac{1}{2}g \cdot t^2 \quad (v_0 = 0)$$

$$h_1 = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}$$

Kecepatan benda tersebut adalah:

$$v = v_0 + g \cdot t \quad (v_0 = 0)$$

$$v = gt = g\sqrt{\frac{2h_1}{g}}$$



**Gambar 5.6** Bola yang jatuh dari ketinggian  $h$ .

Jadi, energi kinetik bola di titik B adalah:

$$\begin{aligned} E_{kB} &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m \cdot \left( g \sqrt{\frac{2h_1}{g}} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} m \cdot g^2 \cdot \frac{2h_1}{g} \\ &= mgh_1 \end{aligned}$$

Jumlah energi kinetik dan energi potensial setelah benda jatuh sejauh  $h_1$  (di titik B) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{mB} &= E_{kB} + E_{pB} \\ &= mgh_1 + (mgh - mgh_1) \\ &= mgh \end{aligned}$$

Jadi, energi mekanik di titik B adalah  $E_{mB} = mgh$

Berdasarkan perhitungan menunjukkan energi mekanik di titik A besarnya sama dengan energi mekanik di titik B ( $E_{mA} = E_{mB}$ ). Jadi, dapat disimpulkan bahwa jumlah energi mekanik benda yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi adalah tetap.

Jika pada saat kedudukan di A jumlah energi potensial dan energi kinetik adalah  $E_{pA} + E_{kA}$ , sedangkan pada saat kedudukan di B jumlah energi potensial dan energi kinetik adalah  $E_{pB} + E_{kB}$ , maka:  $E_{pA} + E_{kA} = E_{pB} + E_{kB}$  atau  $E_p + E_k = \text{tetap}$ . Inilah yang dinamakan Hukum kekekalan energi mekanik.

## ● TUGAS



*Lakukanlah tugas berikut bersama kelompok Anda!*

Tujuan : menyelidiki hukum kekekalan energi mekanik.

Alat dan bahan : bola pingpong.

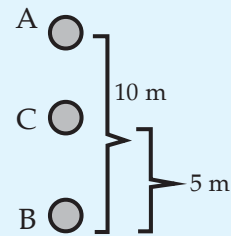
Langkah percobaan :

1. Jatuhkanlah bola pingpong dari ketinggian 1,5 m di atas lantai!
2. Amatilah gerak jatuhnya bola!
3. Dimanakah gerak bola dipercepat?
4. Mempunyai energi apakah bola tersebut? Bagaimana hubungan energi kinetik tersebut?
5. Buatlah kesimpulan dan kumpulkan di meja guru!



## CONTOH SOAL

1. Sebuah benda yang massanya 2 kg dilepas dari ketinggian 10 m di atas tanah (A). Jika diketahui  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah kecepatan benda ketika mencapai tanah (B) dan kecepatan benda ketika berada di tengah antara tinggi semula dan tanah (C)!



Diketahui :  $m = 2 \text{ kg}$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$h = 10 \text{ m}$$

Ditanyakan : a.  $v$  ketika mencapai tanah = ....?

b.  $v$  di tengah-tengah = ....?

Jawab :

a.  $E_{mA} = E_{mB}$

$$\frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + mgh_A = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 + mgh_B$$

$$0 + 2 \cdot 10 \cdot 10 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot v_B^2 + 0$$

$$200 = v_B^2$$

$$v_B^2 = \sqrt{200}$$

$$v_B = 10 \sqrt{2} \text{ m/s}$$

b.  $E_{mA} = E_{mC}$

$$E_{pA} + E_{kA} = E_{pC} + E_{kC}$$

$$mgh_A + \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = mgh_C + \frac{1}{2} m \cdot v_C^2$$

$$2 \cdot 10 \cdot 10 + 0 = 2 \cdot 10 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot v_C^2$$

$$200 = 100 + v_C^2$$

$$v_C^2 = 200 - 100$$

$$v_C = \sqrt{100}$$

$$v_C = 10 \text{ m/s}$$

2. Sebuah bola dengan massa 1 kg dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal 20 m/s. Bila  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah energi kinetik saat benda mencapai ketinggian 10 m?

Diketahui :  $m = 1 \text{ kg}$                        $g = 10 \text{ m/s}^2$   
                    $h = 10 \text{ m}$                        $v_A = 20 \text{ m/s}$

Ditanyakan :  $E_{kB} = \dots?$

Jawab :

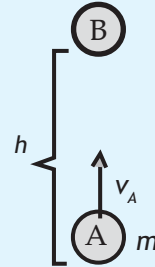
$$E_{mA} = E_{mB}$$

$$mgh_A + \frac{1}{2} m v_A^2 = mgh_B + \frac{1}{2} m v_B^2$$

$$0 + \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 20^2 = 1 \cdot 10 \cdot 10 + E_{kB}$$

$$200 = 100 + E_{kB}$$

$$E_{kB} = 100 \text{ J}$$



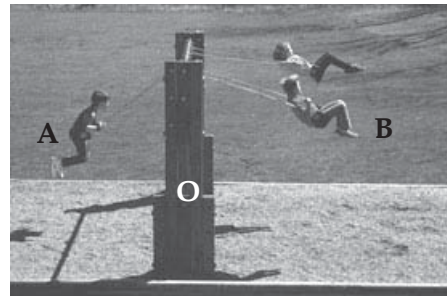
### UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal di bawah ini di buku tugas Anda!

1. Sebuah benda yang bermassa 5 kg jatuh dari ketinggian  $h$  dan menghantam tanah dengan energi kinetik 250 joule. Hitunglah ketinggian benda tersebut!
2. Peluru yang massanya 100 gram ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan awal 16 m/s. Hitunglah energi kinetik yang hilang saat tingginya 10 m!

## E. Penerapan Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Perhatikan Gambar 5.8! Salah satu aplikasi hukum kekekalan energi mekanik adalah pada permainan ayunan. Mula-mula usaha luar diberikan kepada sistem untuk membawa ayunan dari titik terendah  $O$  ke titik tertinggi  $A$  dan  $B$ . Di titik  $A$  dan  $B$ , sistem memiliki energi potensial maksimum dan energi kinetiknya nol. Ketika sistem mulai berayun, energi potensial mulai berkurang karena sebagian energi potensial diubah menjadi energi kinetik (sesuai dengan hukum kekekalan energi mekanik).



Sumber: CD Clip Art.

**Gambar 5.8** Mainan ayunan menerapkan hukum kekekalan energi mekanik.

Pada waktu ayunan mencapai titik  $O$  energi potensial bandul nol karena semua energi potensialnya telah berubah menjadi energi kinetik. Selanjutnya pada perjalanan dari  $O$  ke  $B$  energi kinetik makin kecil karena sebagian energi kinetik diubah menjadi energi potensial. Ketika bandul tiba di  $B$  seluruh energi kinetik bandul telah diubah menjadi energi potensial (di titik ini energi potensial maksimum).

Jika selama ayunan berlangsung ada hambatan udara maka hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku lagi. Ayunan makin lama makin melemah dan bandul tidak akan mencapai titik  $A$ . Suatu saat akhirnya bandul akan berhenti. Ketika Anda ukur suhu bandul yang sudah berhenti ini dengan alat yang memiliki ketelitian tinggi, maka akan terbaca suhu bandul naik. Hal ini menunjukkan bahwa hambatan udara menyebabkan sebagian energi mekanik sistem berubah menjadi energi panas. Contoh lain penerapan hukum kekekalan energi mekanik adalah gerak pada bidang miring, gerak melingkar, dan gerak parabola.

### ● TUGAS



Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok dapat terdiri atas 5 sampai 8 anak. Carilah contoh penerapan hukum kekekalan energi mekanik yang ada di sekitar Anda. Amati, dan selidiki prinsip kerjanya sehingga Anda dapat mengatakan bahwa hal tersebut sebagai contoh penerapan hukum kekekalan energi mekanik. Presentasikan hasil penyelidikan kelompok Anda di depan. Jika perlu alat peraga, buatlah alat peraga sederhana. Jika semua kelompok telah selesai presentasi, buatlah kesimpulan secara individu dan kumpulkan di meja guru!



### ● UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!*

1. Sebuah benda berada di bidang miring yang licin. Apa hubungan antara kecepatan meluncur benda dengan kemiringan bidang?
2. Benda yang massanya  $0,1$  kg ditembakkan dengan sudut elevasi  $30^\circ$  dengan kecepatan awal  $9$  m/s. Berapa energi benda saat di puncak gerakannya?
3. Sebuah bola ditembakkan miring ke atas dengan sudut elevasi  $30^\circ$  dan dengan energi kinetik  $400$  J. Jika  $g = 10$  m/s<sup>2</sup>, maka berapa energi kinetik dan energi potensial bola pada saat mencapai titik tertinggi?

## ● RANGKUMAN

1. Usaha adalah perkalian antara besaran gaya dengan perpindahan benda.
2. Persamaan usaha yang dilakukan gaya membentuk sudut sembarang adalah  $W = F \cdot s \cos \alpha$
3. Persamaan usaha oleh berbagai gaya secara serentak adalah
$$W = \left( \sum_{n=1}^n F_{xn} \right) s.$$
4. Energi potensial dirumuskan  $E_p = m g h$
5. Persamaan yang menunjukkan hubungan antara usaha dengan energi potensial gravitasi adalah  $W = \Delta E_p$ .
6. Persamaan energi kinetik adalah  $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ .
7. Persamaan yang menunjukkan hubungan energi kinetik dengan usaha adalah  $\Delta E_k = W$
8. Persamaan hukum kekekalan energi adalah  $E_{mA} = E_{mB}$ .

## ● UJI KOMPETENSI

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!*

1. Sebuah gaya konstan 50 N bekerja pada suatu benda hingga benda berpindah sejauh 10 m. Hitunglah usaha yang dilakukan gaya tersebut bila sudut antara gaya dan perpindahan  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$ !
2. Balok bermassa 150 kg yang terletak pada papan miring  $30^\circ$  ditarik dengan gaya 200 N. Jika panjang papan 7 m,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , dan koefisien geseknya 0,2; maka hitunglah usaha yang dilakukan gaya tersebut sepanjang bidang miring!
3. Sebuah benda dengan massa 2 kg bergerak dengan kecepatan awal 20 m/s, kemudian dipercepat dengan percepatan  $4 \text{ m/s}^2$ . Hitunglah kecepatan benda setelah 10 s dan energi kinetiknya!
4. Sebuah bola terletak pada ketinggian 20 m dari tanah ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ). Hitunglah kecepatan bola pada ketinggian 10 m jika bola jatuh bebas dan jika bola diberi kecepatan awal 5 m/s!



5. Sebuah benda bermassa 10 kg bergerak dalam suatu garis lurus mendatar dengan kelajuan tetap 8 m/s. Sebuah gaya sebesar 40 N dikerjakan pada benda searah dengan arah gerak benda dan dilepas setelah benda tersebut menempuh jarak 5 m.
  - a. Berapakah kecepatan benda pada saat gaya dilepaskan?
  - b. Hitunglah pertambahan energi kinetik akibat gaya tersebut!
6. Sebuah bola dengan massa 2 kg digantung dengan tali sepanjang 1 m. Benda tersebut dipukul sehingga berayun dengan kecepatan 4 m/s. Hitunglah tinggi maksimum bola! ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )
7. Sebuah pedati yang penuh dengan muatan ditarik oleh dua ekor kuda. Gaya tarik masing-masing kuda adalah 100 N dan 150 N dan membentuk sudut  $30^\circ$ . Jika pedati tersebut harus mengantar muatan sejauh 10 km, maka jawablah pertanyaan berikut.
  - a. Benarkah usaha yang dilakukan kedua kuda tersebut kurang dari 2 juta joule?
  - b. Apabila gaya gesek antara roda dan jalan diperhitungkan dan besarnya 100 N, maka berapa usaha yang dilakukan oleh kedua kuda tersebut setelah menempuh perjalanan 5 km?
  - c. Jelaskan keuntungan dan kerugian dengan menggunakan transportasi pedati!
8. Sebuah bola bermassa 2 kg ditendang mendatar, sehingga bola bergerak dengan kecepatan 5 m/s. Kemudian bola tersebut ditendang dengan gaya 40 N searah dengan perpindahan bola sehingga bola menempuh jarak 10 m.
  - a. Benarkah dengan adanya gaya 40 N akan menambah besarnya energi kinetik?
  - b. Berapa besar pertambahan energi kinetik tersebut?
9. Sebuah bola bermassa 1 kg disundul seorang pemain sepak bola, sehingga bola terpental ke atas dan 10 detik kemudian bola jatuh ke tanah. Bila percepatan  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah energi kinetik bola saat menyentuh tanah!
10. Seorang pekerja diduga mengalami gangguan jiwa, sehingga menerjunkan diri dari gedung tingkat tiga yang mempunyai ketinggian 25 m. ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ ).
  - a. Menurut fisika, benarkah berlaku hukum kekekalan energi pada orang tersebut?
  - b. Bila massa orang tersebut 50 kg, berapa kecepatan orang tersebut saat mencapai tanah!
  - d. Apakah perbuatan tersebut benar menurut Anda? Berikan alasannya!

## TUGAS PROYEK

Rancanglah sebuah percobaan untuk menyelidiki energi yang diperlukan untuk melakukan usaha memindahkan beban ke tempat yang lebih tinggi. Anda bisa membandingkan antara saat beban diangkat langsung dan saat menggunakan bidang miring dengan sudut yang diubah-ubah. Selidiki juga faktor-faktor yang memengaruhi percobaan Anda, baik faktor yang mendukung dan menghambat. Buatlah laporan ilmiah dari percobaan tersebut. Sertakan perhitungan matematis dan analisis Anda agar laporan terlihat lebih menarik. Kumpulkan di meja guru!



## REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

## BAB 6

# IMPULS DAN MOMENTUM

### Tujuan Pembelajaran

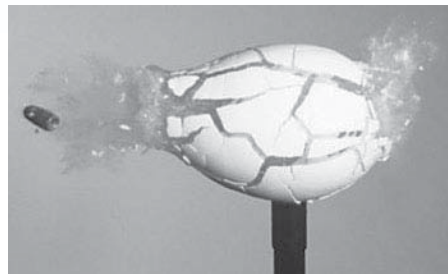
Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan, dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep hubungan impuls, momentum dan tumbukan serta dapat menggunakan dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Impuls
- Momentum
- Tumbukan
- Lenting
- Koefisien Restitusi
- Gaya Impulsif

Pada bab ini Anda akan mempelajari konsep impuls dan momentum. Kedua konsep ini baru bagi Anda karena belum pernah dikenalkan di SMP. Momentum memiliki arti yang berbeda dengan arti keseharian. Anda mungkin pernah mendengar orang mengatakan “Saat ini adalah momentum yang tepat untuk meluncurkan album baru”. Kata momentum pada kalimat tersebut memiliki arti berbeda dengan “momentum” dalam fisika. Momentum dalam fisika merupakan ukuran kesukaran dalam memberhentikan suatu benda yang bergerak. Momentum erat hubungannya dengan massa dan kecepatan.

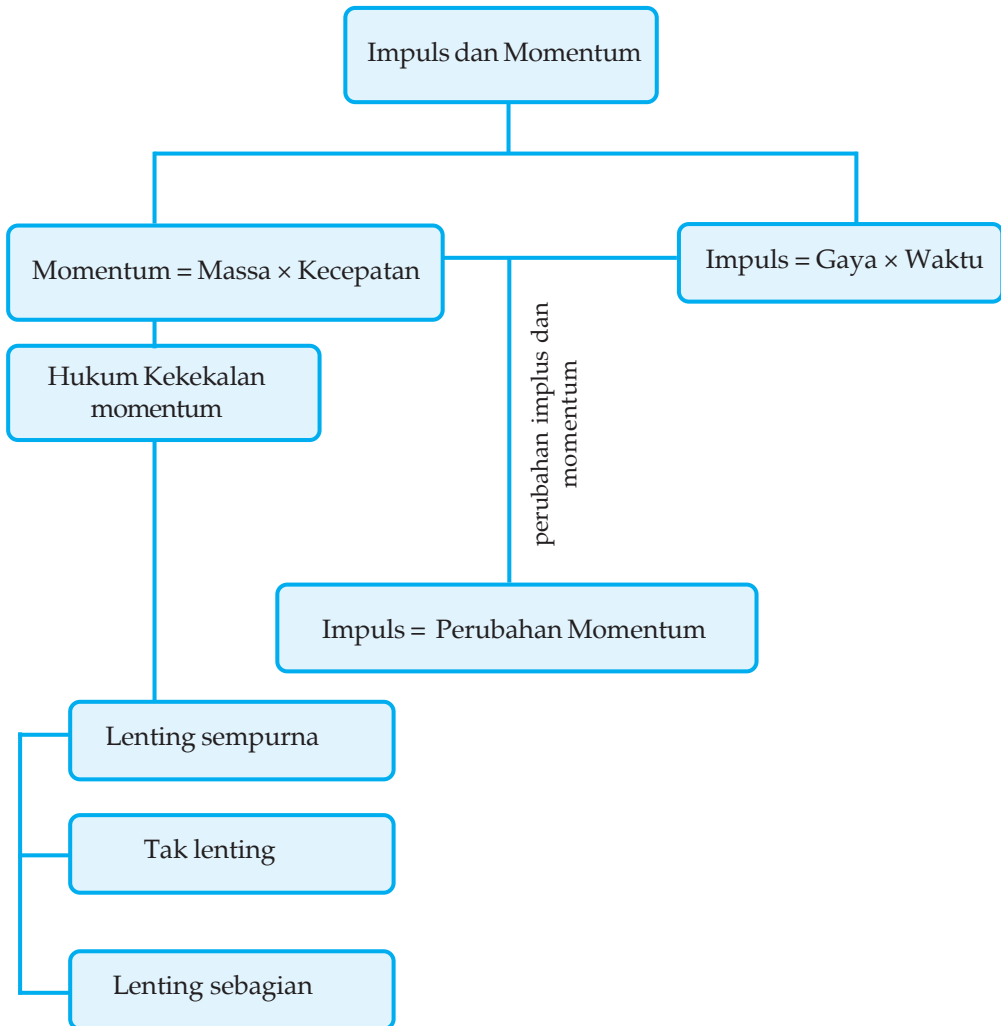
Konsep ini juga mempelajari kejadian bertumbukannya dua benda atau lebih dan menganalisis gerak. Mempelajari hukum kekekalan momentum merupakan salah satu konsep penting dalam fisika. Ilmuwan yang berjasa pada penemuan hukum kekekalan momentum, antara lain, John Willis, Cristopher Wren, dan Christiam Huygens.



Sumber: Jendela Iptek, Gaya dan Gerak.

**Gambar 6.1** Peluru yang menembus media merupakan salah satu contoh tumbukan.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini, coba Anda perhatikan peta konsep berikut!



## A. Pengertian Momentum dan Impuls

Pernahkan Anda menyaksikan atau mendengar berita mengenai peluncuran roket? Bagaimana sistem yang bekerja pada peluncuran tersebut? Prinsip kerja roket berdasarkan hukum kekekalan momentum. Saat masih berada di landasan (masih diam), momentum roket sama dengan nol. Ketika bahan bakar direaksikan, gas panas ditembakkan ke bawah dan badan roket naik untuk menyeimbangkan momentum totalnya. Pada fase ini momentum roket tetap bernilai nol. Apakah yang dimaksud dengan momentum?



Sumber: Encarta Encyclopedia.

Gambar 6.2 Roket lepas landas.

Misalkan terdapat sebuah gaya  $F$  bekerja pada benda dengan massa  $m$  pada saat  $t = t_1$  hingga saat  $t = t_2$ . Apabila kecepatan benda pada saat  $t_1$  adalah  $v_1$  dan pada saat  $t_2$  adalah  $v_2$ , maka percepatan benda tersebut

adalah  $a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$ . Jika  $t_2 - t_1 = \Delta t$  dan  $F = m \cdot a$  (hukum II Newton),

maka persamaannya menjadi sebagai berikut.

$$F = m \cdot \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

$$F \cdot \Delta t = m v_2 - m v_1$$

Nilai  $F \cdot \Delta t$  pada persamaan di atas disebut impuls. Jadi, impuls merupakan hasil perkalian antara gaya ( $F$ ) dan selang waktu ( $\Delta t$ ) selama gaya tersebut bekerja. Bila impuls dilambangkan  $I$ , maka secara matematis dinyatakan sebagai berikut.

$$I = F \cdot \Delta t$$

Keterangan:

$I$  : impuls (Ns)

$F$  : gaya (N)

$\Delta t$  : selang waktu (s)

Sedangkan  $m \cdot v$  dinamakan momentum. Jadi, momentum merupakan hasil kali massa benda dengan kecepatannya.  $mv_1$  adalah momentum benda pada saat kecepatannya  $v_1$  dan  $mv_2$  adalah momentum benda pada saat kecepatannya  $v_2$ . Bila momentum dilambangkan dengan  $p$ , maka persamaan matematisnya adalah sebagai berikut.

$$p = m \cdot v$$

Keterangan:

$p$  : momentum (kg m/s)

$m$  : massa (kg)

$v$  : kecepatan (m/s)

Hubungan antara momentum dan impuls dinyatakan dengan persamaan  $F \cdot \Delta t = m v_2 - m v_1$ . Jadi, secara fisis besarnya impuls yang bekerja pada suatu benda pada selang waktu tertentu sama dengan bertambahnya momentum benda tersebut.



### CONTOH SOAL

1. Sebuah bola bergerak dengan kecepatan 5 m/s. Bila massa bola tersebut 3 kg, maka tentukan momentum bola tersebut!

Diketahui :  $v = 5 \text{ m/s}$

$m = 3 \text{ kg}$

Ditanyakan :  $p = \dots ?$

Jawab :

$$p = m \cdot v$$

$$= 3 \cdot 5$$

$$= 15 \text{ kg m/s}$$

Jadi, momentum bola sebesar 15 kg m/s.

2. Sebuah benda bermassa 10 kg diberi gaya konstan 25 N sehingga kecepatannya bertambah dari 15 m/s menjadi 20 m/s. Hitunglah impuls yang bekerja pada benda dan lamanya gaya bekerja!

Diketahui :  $m = 10 \text{ kg}$

$F = 25 \text{ N}$

$v_1 = 15 \text{ m/s}$

$v_2 = 20 \text{ m/s}$

Ditanyakan : a.  $I = \dots ?$

b.  $\Delta t = \dots ?$

Jawab :

$$\text{a. } I = m v_2 - m v_1$$

$$= 10 \cdot 20 - 10 \cdot 15$$

$$= 50 \text{ Ns}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } I &= F \cdot \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \frac{I}{F} \\ &= \frac{50}{25} = 2 \text{ s} \end{aligned}$$

Jadi, gaya bekerja selama 2 s.



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!*

1. Sebuah bola besi yang massanya 500 gr bergerak dengan kelajuan tetap sehingga mempunyai energi kinetik 2500 joule. Berapa momentum yang dimiliki bola besi tersebut?
2. Gaya konstan 500 N diberikan kepada sebuah benda sehingga besar kecepatannya berubah dari 20 m/s menjadi 35 m/s. Jika massa benda 2,5 kg, tentukan:
  - a. besarnya impuls dan
  - b. lama waktu gaya menyentuh benda!

## B. Hukum Kekekalan Momentum

Untuk memahami hukum kekekalan momentum lakukan tugas berikut!

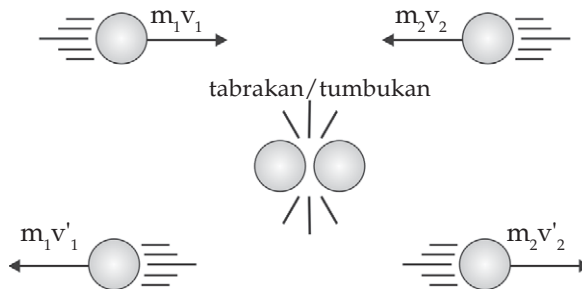
### TUGAS



Rancanglah sebuah kegiatan sederhana untuk menyelidiki mengenai hukum kekekalan momentum. Misalnya, Anda dapat menggunakan bola-bola biliar atau kelereng dalam penyelidikan tersebut. Lakukan kegiatan tersebut secara mandiri dan buatlah tulisan singkat tentang kegiatan Anda. Mintalah kepada guru Anda agar menunjuk salah satu siswa untuk memeragakan kegiatan rancangannya. Diskusikan bersama hasil peragaan teman Anda, kemudian buatlah kesimpulan dan kumpulkan di meja guru!



Perhatikan Gambar 6.3! Misalkan dua buah bola pada Gambar 6.3 bergerak berlawanan arah saling mendekati. Bola pertama massanya  $m_1$ , bergerak dengan kecepatan  $v_1$ . Sedangkan bola kedua massanya  $m_2$  bergerak dengan kecepatan  $v_2$ . Jika kedua bola berada pada lintasan yang sama dan lurus, maka pada suatu saat kedua bola akan bertabrakan.



**Gambar 6.3** Hukum kekekalan momentum.

Dengan memperhatikan analisis gaya tumbukan bola pada Gambar 6.3, ternyata sesuai dengan pernyataan hukum III Newton. Kedua bola akan saling menekan dengan gaya  $F$  yang sama besar, tetapi arahnya berlawanan. Akibat adanya gaya aksi dan reaksi dalam selang waktu  $\Delta t$  tersebut, kedua bola akan saling melepaskan diri dengan kecepatan masing-masing sebesar  $v'_1$  dan  $v'_2$ .

Impuls yang terjadi selama interval waktu  $\Delta t$  adalah  $F_1 \Delta t = -F_2 \Delta t$ . Anda ketahui bahwa  $I = F \Delta t = \Delta p$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= -\Delta p_2 \\ m_1 v_1 - m_1 v'_1 &= -(m_2 v_2 - m_2 v'_2) \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ p_1 + p_2 &= p'_1 + p'_2 \\ \text{Momentum Awal} &= \text{Momentum Akhir}\end{aligned}$$

Keterangan:

$p_1, p_2$  : vektor momentum benda 1 dan 2 sebelum tumbukan

$p'_1, p'_2$  : vektor momentum benda 1 dan 2 sesudah tumbukan

$m_1, m_2$  : massa benda 1 dan 2

$v_1, v_2$  : kelajuan benda 1 dan 2 sebelum tumbukan

$v'_1, v'_2$  : kelajuan benda 1 dan 2 sesudah tumbukan

Persamaan di atas dinamakan hukum kekekalan momentum. Hukum ini menyatakan bahwa “jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem, maka momentum total sesaat sebelum sama dengan momentum total sesudah tumbukan”. Ketika menggunakan persamaan ini, Anda harus memerhatikan arah kecepatan tiap benda.



### CONTOH SOAL

- Sebuah peluru dengan massa 50 g dan kecepatan 1.400 m/s mengenai dan menembus sebuah balok dengan massa 250 kg yang diam di bidang datar tanpa gesekan. Jika kecepatan peluru setelah menembus balok 400 m/s, maka hitunglah kecepatan balok setelah tertembus peluru!

Diketahui :  $m_1 = 50 \text{ g} = 0,05 \text{ kg}$                        $m_2 = 250 \text{ kg}$   
 $v_1 = 1.400 \text{ m/s}$      $v_2 = 0$   
 $v'_1 = 400 \text{ m/s}$

Ditanyakan :  $v'_2 = \dots ?$

Jawab :

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ 0,05 \cdot 1.400 + 250 \cdot 0 &= 0,05 \cdot 400 + 250 \cdot v'_2 \\ 70 &= 20 + 250 v'_2 \\ v'_2 &= \frac{70 - 20}{250} \\ v'_2 &= 0,2 \text{ m/s} \end{aligned}$$



### UJI PEMAHAMAN

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!

- Balok kayu yang massanya 3 kuintal ditembak peluru yang massanya 250 gram dengan kecepatan 1.000 m/s. Jika peluru menembus balok kayu dan keluar dari balok dengan kecepatan 500 m/s, maka berapakah kecepatan balok kayu setelah tumbukan?
- Senapan yang massanya 4 kg menembakkan peluru yang massanya 20 gram dengan kelajuan 500 m/s. Berapa kecepatan mundur senapan sesaat setelah peluru melesat?

## C. Tumbukan

Apa yang Anda ketahui tentang tumbukan? Coba lakukan tugas berikut!

### TUGAS



Rancanglah sebuah kegiatan sederhana untuk menyelidiki tentang tumbukan. Anda dapat melakukan hal-hal seperti berikut.

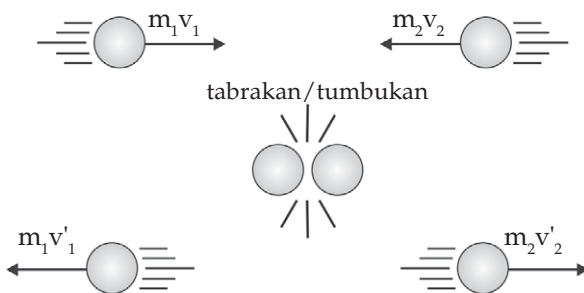
1. Anda dapat menggelindingkan sebuah bola di lantai datar kemudian gelindingkan bola kedua dengan kecepatan lebih tinggi pada lintasan yang sama sehingga menumbuk bola pertama. Amatilah yang terjadi!
2. Jatuhkan sebuah bola pingpong dari ketinggian 1 m di atas lantai. Amatilah yang terjadi!

Buatlah sebuah kesimpulan dari kegiatan yang Anda rancang dan kumpulkan di meja guru!

Pada bahasan kali ini Anda hanya akan mempelajari tumbukan yang paling sederhana, yaitu tumbukan sentral. Tumbukan sentral adalah tumbukan yang terjadi bila titik pusat benda yang satu menuju ke titik pusat benda yang lain. Berdasarkan sifat kelentingan atau elastisitas benda yang bertumbukan, tumbukan dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting sama sekali.

### 1. Tumbukan Lenting Sempurna

Dua buah benda dikatakan mengalami tumbukan lenting sempurna jika pada tumbukan itu tidak terjadi kehilangan energi kinetik. Jadi, energi kinetik total kedua benda sebelum dan sesudah tumbukan adalah tetap.



Gambar 6.4 Tumbukan lenting sempurna.

Pada tumbukan lenting sempurna berlaku hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi kinetik.

Perhatikan Gambar 6.4! Dua buah benda memiliki massa masing-masing  $m_1$  dan  $m_2$  bergerak saling mendekati dengan kecepatan sebesar  $v_1$  dan  $v_2$  sepanjang

lintasan yang lurus. Setelah keduanya bertumbukan masing-masing bergerak dengan kecepatan sebesar  $v'_1$  dan  $v'_2$  dengan arah saling berlawanan. Berdasarkan hukum kekekalan momentum dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ m_1 v_1 - m_1 v'_1 &= m_2 v'_2 - m_2 v_2 \\ m_1 (v_1 - v'_1) &= m_2 (v'_2 - v_2) \end{aligned}$$

Sedangkan berdasarkan hukum kekekalan energi kinetik, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E_{k1} + E_{k2} &= E'_{k1} + E'_{k2} \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 &= \frac{1}{2} m_1 (v'_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v'_2)^2 \\ m_1 ((v'_1)^2 - (v_1)^2) &= m_2 ((v'_2)^2 - (v_2)^2) \\ m_1 (v_1 + v'_1)(v_1 - v'_1) &= m_2 (v'_2 + v_2)(v'_2 - v_2) \end{aligned}$$

Jika persamaan di atas saling disubstitusikan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} m_1 (v_1 + v'_1)(v_1 - v'_1) &= m_1 (v'_2 + v_2)(v_1 - v'_1) \\ v_1 + v'_1 &= v'_2 + v_2 \\ v_1 - v_2 &= v'_2 - v'_1 \\ -(v_2 - v_1) &= v'_2 - v'_1 \end{aligned}$$

## 2. Tumbukan Lenting Sebagian

Tumbukan lenting sebagian terjadi apabila setelah tumbukan ada sebagian energi yang hilang. Pada tumbukan jenis ini, energi kinetik berkurang selama tumbukan. Oleh karena itu, hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku. Besarnya kecepatan relatif juga berkurang dengan suatu faktor tertentu yang disebut *koefisien restitusi* ( $e$ ).

Nilai restitusi berkisar antara 0 dan 1 ( $0 \leq e \leq 1$ ). Untuk tumbukan lenting sempurna, nilai  $e = 1$ . Untuk tumbukan tidak lenting sama sekali (subbab 3) nilai  $e = 0$ . Sedangkan untuk tumbukan lenting sebagian mempunyai nilai  $e$  antara 0 dan 1 ( $0 < e < 1$ ). Derajat berkurangnya

kecepatan relatif benda setelah tumbukan dirumuskan  $e = - \frac{(v'_2 - v'_1)}{(v_2 - v_1)}$ .

### 3. Tumbukan Tidak Lenting Sama Sekali

Pada tumbukan jenis ini, kecepatan benda-benda sesudah tumbukan sama besar (benda yang bertumbukan saling melekat). Perhatikan Gambar 6.5! Misalnya, sebuah peluru dengan massa  $m_1$  dan kecepatan  $v_1$  menumbuk bola yang mempunyai kecepatan  $v_2$  di atas lantai horizontal dengan massa  $m_2$ . Setelah tumbukan, peluru melekat atau bersarang di dalam bola dan bergerak secara bersama-sama.



**Gambar 6.5** Tumbukan tidak lenting sama sekali.

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali berlaku persamaan berikut.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

$$\text{Jika } v'_1 = v'_2 = v', \text{ maka } m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$



#### CONTOH SOAL

- Sebuah bola bermassa 4 kg bergerak dengan kecepatan 16 m/s menumbuk lenting sempurna bola lain bermassa 6 kg yang sedang bergerak dengan kecepatan 10 m/s. Hitunglah kecepatan bola setelah tumbukan jika kedua benda bergerak searah!

Diketahui :  $m_1 = 4 \text{ kg}$

$m_2 = 6 \text{ kg}$

$v_1 = 16 \text{ m/s}$

$v_2 = 10 \text{ m/s}$

Ditanyakan :  $v'_1$  dan  $v'_2 = \dots ?$

Jawab :

$$v'_2 - v'_1 = -(v_2 - v_1)$$

$$v'_2 - v'_1 = -(10 - 16)$$

$$v'_2 - v'_1 = 6$$

$$v'_2 = v'_1 + 6 \quad \dots\dots\dots 1)$$

Ingat, pada tumbukan lenting sempurna berlaku hukum kekekalan momentum.

$$\begin{aligned}
 m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\
 4 \cdot 16 + 6 \cdot 10 &= 4 \cdot v'_1 + 6 \cdot v'_2 \\
 64 + 60 &= 4v'_1 + 6v'_2 \\
 124 &= 4v'_1 + 6v'_2 \quad \dots\dots\dots 2)
 \end{aligned}$$

Persamaan 1) disubstitusikan ke dalam persamaan 2)

$$\begin{aligned}
 124 &= 4v'_1 + 6(v'_1 + 6) \\
 124 &= 4v'_1 + 6v'_1 + 36 \\
 124 - 36 &= 10v'_1 \quad \Rightarrow 10v'_1 = 88 \\
 v'_1 &= \frac{88}{10} \\
 v'_1 &= 8,8 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Hasil ini kita substitusikan ke dalam persamaan 1)

$$\begin{aligned}
 v'_2 &= v'_1 + 6 \\
 &= 8,8 + 6 \\
 &= 14,8 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Jadi, kecepatan bola pertama dan kedua setelah tumbukan adalah 8,8 m/s dan 14,8 m/s.

2. Sebuah bola tenis dilepas dari ketinggian 200 m, jatuh mengenai lantai hingga terjadi elastis sebagian. Hitunglah tinggi pemantulan pertama yang dapat dicapai oleh bola tenis! ( $e = 0,2$ )

Diketahui :  $h_1 = 200 \text{ m}$   
 $e = 0,2$

Ditanyakan :  $h_2 = \dots ?$

Jawab :

Berdasarkan persamaan gerak jatuh bebas, besar kecepatan bola memenuhi persamaan  $v = \sqrt{2gh}$ .

Untuk kecepatan lantai sebelum dan sesudah tumbukan sama dengan nol ( $v_2 = v'_2 = 0$ ). Jika arah ke benda diberi harga negatif, maka persamaan adalah  $v_1 = -\sqrt{2gh_1}$  dan  $v'_1 = +\sqrt{2gh_2}$ .

$$e = - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)} = - \frac{(0 - \sqrt{2gh_2})}{0 - (-\sqrt{2gh_1})} = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}}$$

$$e = \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}}$$

$$0,2 = \sqrt{\frac{h_2}{200}}$$

$$0,04 = \frac{h_2}{200}$$

$$h_2 = 0,04 \times 200$$

$$= 8 \text{ m}$$

Jadi, tinggi bola setelah memantul adalah 8 m.



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Sebuah bola golf bermassa 0,2 kg dipukul menggunakan stik sehingga melesat dengan kecepatan 50 m/s. Jika selang waktu kontak antara stik dan bola 0,05 sekon, maka berapakah gaya yang dikerjakan stik?
2. Sebuah senapan yang massanya 2 kg menembakkan peluru yang massanya 4 gram dengan kecepatan 0,5 km/s. Berapakah kecepatan gerak ke belakang senapan sesaat setelah peluru melesat?
3. Dua benda A dan B masing-masing massanya 2 kg dan 4 kg, bergerak searah di atas lantai yang licin (A mengejar B) dengan kecepatan 10 m/s dan 1 m/s. Pada suatu saat bertumbukkan sehingga kecepatan B menjadi 3 m/s. Hitunglah kecepatan A setelah menumbuk B!
4. Sebuah mobil yang massanya 10.000 kg bergerak dengan kecepatan 15 m/s. Mobil tersebut menumbuk mobil lain yang sedang diparkir. Jika massa mobil yang diparkir 5.000 kg dan gerak kedua mobil bergandengan setelah tumbukan, maka hitunglah kecepatan kedua mobil setelah tumbukan!



5. Sebuah bola berada 5 m di atas lantai mendatar, kemudian dijatuhkan bebas ternyata oleh lantai akan dipantulkan lagi ke atas yang pertama kali setinggi 3 m. Berapakah ketinggian pantulan kedua kalinya?

## ● RANGKUMAN

1. Momentum didefinisikan sebagai hasil kali massa dengan kecepatannya.
2. Persamaan momentum adalah  $p = m \times v$ .
3. Impuls didefinisikan sebagai hasil kali gaya rata-rata dan selang waktu selama gaya bekerja.
4. Persamaan impuls adalah  $I = F \Delta t$ .
3. Persamaan yang menunjukkan hubungan momentum dan impuls adalah  $I = \Delta p$ .
4. Persamaan hukum kekekalan momentum adalah  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$ .
5. Tumbukan dikelompokkan menjadi 3, yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting sama sekali.
6. Persamaan untuk koefisien restitusi adalah  $e = - \frac{(v'_2 - v'_1)}{(v_2 - v_1)}$ .

## ● TUGAS PROYEK

Bagilah kelas Anda menjadi beberapa kelompok. Tiap kelompok dapat terdiri atas 3 sampai 5 anak. Rancang dan buatlah sebuah raket mainan yang bahan menggunakan barang-barang bekas yang ada disekitar lingkungan Anda. Gunakanlah konsep impuls dan momentum untuk merancang raket mainan tersebut. Cobalah demonstrasikan hasil karya Anda di depan teman-teman Anda kemudian jelaskanlah prinsip kerja raket mainan tersebut! Jika dinilai layak oleh guru Anda, buatlah raket tersebut dalam jumlah banyak dan jualah di pasar atau tempat keramaian yang lain. Hasil penjualan dapat Anda gunakan untuk membeli peralatan sekolah atau ditabung.

## UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!

1. Sebuah peluru dengan massa 25 g dan kecepatannya 700 m/s menembus sebuah balok diam yang bermassa 125 kg. Jika kecepatan peluru setelah menembus balok 200 m/s, maka:
  - a. Benarkah pada peristiwa tersebut berlaku hukum kekekalan momentum? Jelaskan!
  - b. Hitunglah kecepatan balok yang setelah tertembus peluru!
2. Mobil yang bermassa 2.000 kg dan memiliki kecepatan 72 km/jam menumbuk mobil lain di depannya yang memiliki kecepatan 36 km/jam dan massa 3.000 kg. Jika koefisien restitusi sebesar 0,02; maka:
  - a. Benarkah pada peristiwa tersebut berlaku hukum kekekalan momentum? Jelaskan!
  - b. Hitunglah kecepatan kedua buah mobil setelah tumbukan!
3. Karena kurang hati-hati, sebuah truk yang massanya 2.500 kg dan memiliki kecepatan 54 km/jam menabrak sebuah pohon. Jika truk berhenti setelah menyentuh pohon selama  $1\frac{1}{2}$  sekon, maka hitunglah besar gaya truk selama terjadi peristiwa tabrakan!
4. Sebuah bola dengan massa 200 kg bergerak ke kanan dengan kelajuan 10 m/s. Jika bola dipukul sehingga arahnya membalik dengan kelajuan 10 m/s, maka tentukan besar impuls dari pukulan tersebut!
5. Seorang nelayan ingin pergi melaut bersama dua temannya. Berat masing-masing nelayan 50 kg, sedangkan berat perahu 100 kg. Saat perahu bergerak dengan kecepatan 10 m/s ke arah laut, sebuah ombak besar menerjangnya. Jika kecepatan ombak 3 m/s dan diperkirakan massa air yang menghantam perahu 50 kg, maka hitunglah kecepatan perahu setelah diterjang ombak!



## REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

# BAB 7

## ROTASI BENDA TEGAR

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan, dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep torsi, momentum sudut, momen inersia dalam cakupan hukum Newton, serta dapat menggunakannya dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Rotasi
- Momen Inersia
- Torsi
- Keseimbangan
- Translasi
- Momentum Sudut

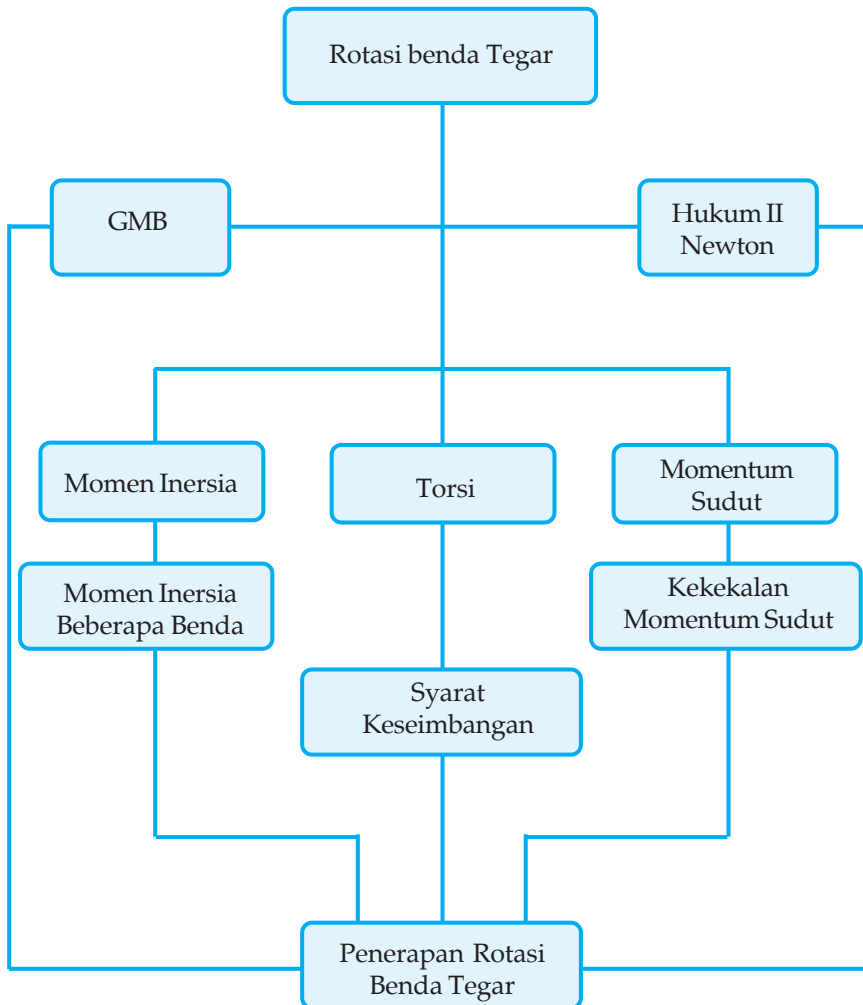
Di kota-kota besar, seperti Jakarta, sering dijumpai mobil atau sepeda motor yang sudah dimodifikasi. Hasil modifikasi biasanya tampak aneh dan lain dari yang sudah ada. Namun, terkadang saat dikendarai pada kecepatan mobil-mobil yang dimodifikasi timbul masalah seperti tidak stabil, banyak getaran, bahkan yang lebih berbahaya lagi sulit dikendalikan. Sebenarnya pada saat merancang mobil modifikasi tentunya sudah diperhitungkan hal-hal yang terkait dengan sistem gerakanya, agar mobil atau sepeda motor dapat bergerak dengan aman dan nyaman (tidak hanya sekedar mengutak-atik).

Bagaimana suatu sistem gerak harus dibuat agar memiliki kestabilan? Apa saja yang harus diperhatikan? Pada bab ini kita akan membahas konsep-konsep dan teori-teori yang mendasarinya. Konsep ini penting Anda kuasai sebagai penerus estafet pembangunan bangsa.



Gambar 7.1 Modifikasi mobil.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini, coba Anda perhatikan peta konsep berikut!



## A. Pengertian Benda Tegar

*Benda tegar* adalah benda yang tidak mengalami perubahan bentuk akibat pengaruh gaya atau momen gaya. Sebenarnya benda tegar hanyalah suatu model idealisasi. Karena pada dasarnya semua benda akan mengalami perubahan bentuk apabila dipengaruhi oleh suatu gaya atau momen gaya. Namun, karena perubahannya sangat kecil, pengaruhnya terhadap keseimbangan statis dapat diabaikan.



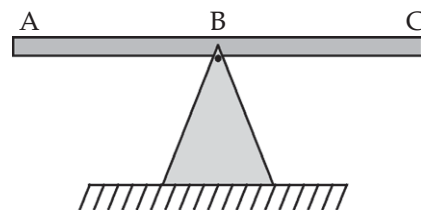
Gambar 7.2 Benda tegar.

Perhatikan Gambar 7.2! Ada dua buah batang, benda A terbuat dari besi dan benda B terbuat dari adonan gandum yang agak lembek. Apabila kedua benda itu diputar dengan memegang salah satu ujungnya, kira-kira apakah yang akan terjadi? Benda A bentuknya relatif tetap, sedangkan benda B akan mengalami perubahan bentuk. Pada putaran dengan frekuensi tertentu benda B akan meregang dan tidak kembali pada bentuk semula. Jadi, dapat dinyatakan bahwa benda A adalah benda tegar dan benda B bukan benda tegar.

## B. Pengaruh Torsi Terhadap Benda Tegar

Apakah yang dimaksud dengan torsi? Perhatikan Gambar 7.3! Apa yang terjadi pada jungkat-jungkit jika sebuah bola diletakkan di titik A, di titik B, atau di titik C?

Saat bola diletakkan di titik A, maka batang jungkat-jungkit akan mengguling yang arah putarannya berlawanan arah jarum jam. Saat bola diletakkan di titik B, batang jungkat-jungkit akan tetap di atas (tidak mengguling). Dan saat bola diletakkan di titik C, batang jungkat-jungkit akan mengguling yang arah putarannya searah jarum jam.



Gambar 7.3 Jungkat-jungkit.

Gerakan mengguling pada batang jungkat-jungkit ini disebabkan oleh pengaruh torsi ( $\tau$ ). Torsi atau momen gaya merupakan gaya yang bekerja pada sebuah benda dengan jarak tertentu terhadap titik pusat pada benda tersebut. Jarak tertentu yang tegak lurus dengan pusat massa

benda disebut lengan gaya atau lengan momen. Jadi, Torsi didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya ( $F$ ) dengan jarak lengan gaya ( $\ell$ ). Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\tau = F \times \ell$$

Keterangan:

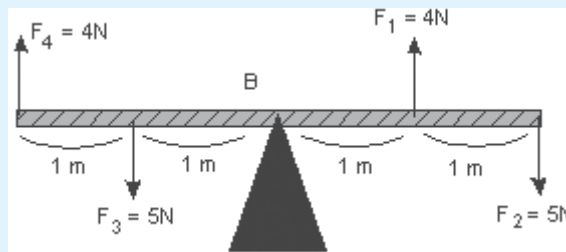
$\tau$  : momen gaya (Hm)

$F$  : gaya (N)

$\ell$  : lengan gaya (m)



### CONTOH SOAL



Perhatikan gambar di atas! Berdasarkan gambar tersebut, tentukan

- $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ , dan  $\tau_4$ !
- Jumlah total torsi yang bekerja!
- Ke mana arah batang mengguling?

Diketahui :  $F_1 = 4 \text{ N}$

$F_2 = 5 \text{ N}$

$F_3 = 5 \text{ N}$

$F_4 = 4 \text{ N}$

$\ell_1, \ell_2, \ell_3, \ell_4 = 1 \text{ m}$

Ditanyakan : a.  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ , dan  $\tau_4 = \dots$ ?

b.  $\Sigma \tau = \dots$ ?

c. Arah batang mengguling?

Jawab :

- Kita tetapkan bahwa arah mengguling searah putaran jarum jam bernilai positif.

$$\begin{aligned}\tau_1 &= -F_1 \cdot \ell_1 \\ &= -4 \cdot 1 \\ &= -4 \text{ Nm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_2 &= F_2 \cdot \ell_2 \\ &= 6 \cdot 2 \\ &= 12 \text{ Nm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_3 &= -F_3 \cdot \ell_3 \\ &= -5 \cdot 1 \\ &= -5 \text{ Nm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_4 &= F_4 \cdot \ell_4 \\ &= 4 \cdot 2 \\ &= 8 \text{ Nm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{b. } \Sigma \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \\ &= -4 + 12 + (-5) + 8 \\ &= 20 - 9 \\ &= 11 \text{ Nm}\end{aligned}$$

- c. Benda akan mengguling searah jarum jam, karena  $\Sigma \tau = 11 \text{ Nm}$  (bernilai positif)

### TUGAS

Diskusikan dengan teman sebangku Anda!  
Bagaimana cara menyeimbangkan jungkat-jungkit jika dua anak yang bermain bersama memiliki massa yang berbeda (misalkan seorang ayah yang bermain jungkat-jungkit dengan anaknya yang masih kecil)? Analisislah dengan pemahaman fisika Anda. Buatlah kesimpulan dan kumpulkan di meja guru!



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Seorang pekerja yang tingginya 160 cm memikul dua beban yang masing-masing beratnya 200 N dan 600 N dengan menggunakan sebuah batang homogen yang panjangnya 1,8 m. Supaya kedudukan kedua beban dapat setimbang, tentukan jarak masing-masing beban dengan pundak pekerja!
2. Jarak sumbu roda belakang dan roda depan sebuah mobil adalah 230 cm. Mobil tersebut memiliki massa totalnya 1 ton dengan letak pusat massa berada 1 m dari roda depan. Berapa beban yang dipikul kedua roda depan tersebut?



## C. Gerak Translasi dan Gerak Rotasi

Gerak translasi atau gerakan menggeser suatu benda disebabkan oleh pengaruh gaya  $F$  pada benda tersebut. Jika jumlah gaya-gaya yang bekerja pada benda tidak sama dengan nol, maka benda akan bergeser dengan percepatan tertentu. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$a = \frac{\sum F}{m}$$

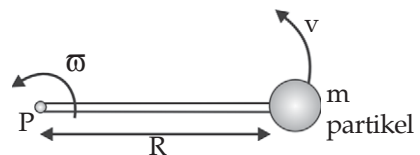
Anda tentu masih ingat rumus Hukum II Newton, bukan? Berdasarkan rumus tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Jika gaya diperbesar, maka percepatan benda makin besar pula.
2. Jika gaya diperkecil, maka percepatan benda makin kecil pula.
3. Nilai perbandingan antara besarnya gaya dan besarnya percepatan adalah konstan, yaitu sama dengan massa benda.

Pada gerak translasi massa benda merupakan ukuran kelembamannya/momen inersia (sifat lembam adalah sifat mempertahankan keadaan mula-mula). Pada kehidupan sehari-hari, kita sering menemui kenyataan bahwa menggeser benda yang massanya besar lebih sulit dibandingkan menggeser benda yang massanya kecil. Jadi, dapat disimpulkan bahwa makin besar ukuran momen inersia suatu benda, makin sulit benda tersebut digeser (melakukan gerak translasi).

Setelah Anda mengerti tentang sifat lembam pada sistem gerak translasi, sekarang Anda akan mempelajarinya pada gerak rotasi. Gerak rotasi (melingkar) adalah gerakan pada bidang datar yang lintasannya berupa lingkaran. Pada gerak rotasi, momen inersia suatu benda bergantung kepada bentuk benda dan letak sumbu putar benda tersebut.

Perhatikan Gambar 7.4! Misalkan Anda memiliki sebuah batang ringan (massa diabaikan) dengan panjang  $R$ . Salah satu ujung batang, yaitu titik  $P$ , ditetapkan sebagai poros rotasi. Pada ujung batang yang lain dihubungkan dengan sebuah partikel bermassa  $m$ . Jika sistem diputar terhadap poros  $P$ , sehingga partikel berotasi dengan kecepatan  $v$ , maka energi kinetik rotasi partikel dapat dinyatakan sebagai berikut.



**Gambar 7.4** Momen inersia pada gerak rotasi.

$$E_k = \frac{1}{2} m \times v^2$$

Karena  $v = R \omega$ , maka

$$E_k = \frac{1}{2} m \times (R\omega)^2 \text{ atau } \frac{1}{2} m \times R^2 \omega^2$$

Faktor  $m \times R^2$  merupakan momen inersia titik terhadap sumbu putarnya, dan diberi notasi  $I$ . Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$I = m \times R^2$$

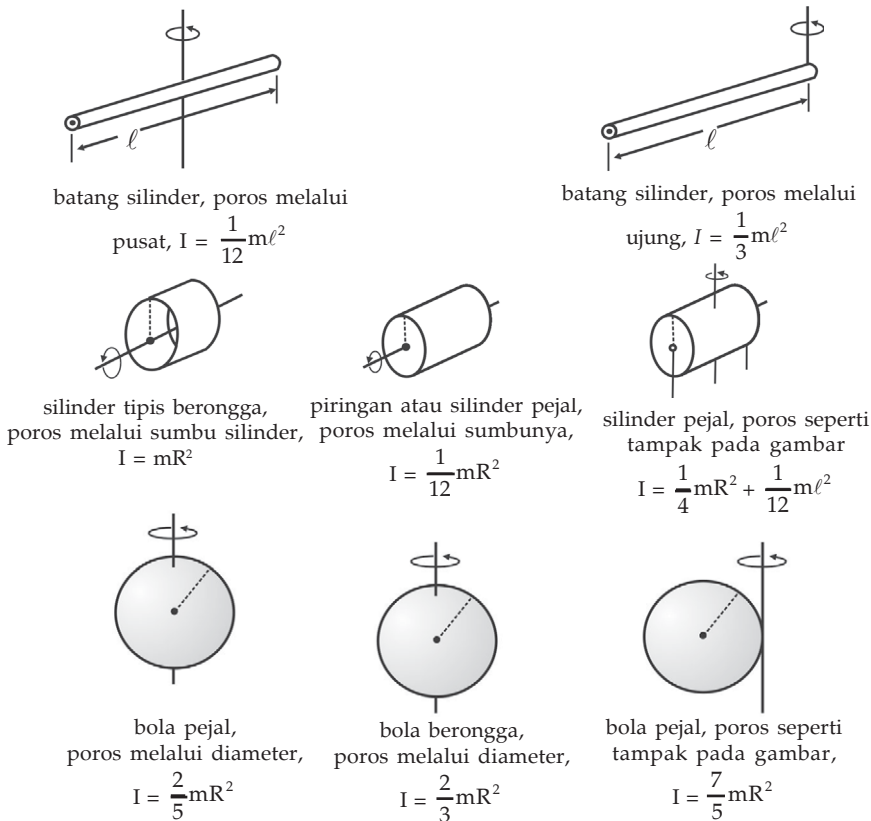
Keterangan:

$I$  : momen inersia ( $\text{kgm}^2$ )

$m$  : massa partikel atau titik ( $\text{kg}$ )

$R$  : jari-jari ( $\text{m}$ )

Momen inersia untuk berbagai jenis benda dapat Anda lihat pada Gambar 7.5 berikut!



**Gambar 7.5** Momen inersia berbagai benda tegar homogen.

## TUGAS



Alat dan Bahan:

1. Kaleng kosong lengkap dengan tutupnya
2. Air secukupnya

Langkah Kegiatan:

1. Pilihlah tempat yang datar!
2. Gulingkan kaleng kosong!
3. Isilah kaleng dengan air sampai penuh kemudian gulingkan!
4. Isilah kaleng dengan air separuhnya saja kemudian gulingkan!
5. Isilah kaleng dengan air tiga perempatnya kemudian gulingkan!
6. Isilah kaleng dengan air seperempatnya kemudian gulingkan!
7. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!



## CONTOH SOAL

1. Sebuah roda gila bermassa 20 kg dan jari-jari girasinya 5 cm. Berapakah momen inersianya?

Diketahui :  $m = 20 \text{ kg}$

$$R = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Ditanyakan :  $I = \dots ?$

Jawab :

$$\begin{aligned} I &= m \cdot R^2 \\ &= 20 \cdot (5 \times 10^{-2})^2 \\ &= 5 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2 \end{aligned}$$

2. Sebuah silinder pejal yang massanya 40 kg dan jari-jari 10 cm, mula-mula diam. Setelah difungsikan selama 5 sekon, silinder

berputar dengan frekuensi  $\frac{40}{\pi} \text{ Hz}$ .

- a. Tentukan percepatan sudutnya!
- b. Tentukan besar momen gaya yang bekerja!

Diketahui :  $m = 40 \text{ kg}$

$t = 5 \text{ sekon}$

$$R = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$$

$$\omega_0 = 0$$

$$f_0 = 0$$

$$f_t = \frac{40}{\pi} \text{ Hz}$$

Ditanyakan : a.  $\alpha$  = .... ?

b.  $\tau$  = .... ?

Jawab :

Silinder pejal ( $I = \frac{1}{2} m R^2$ )

$$\begin{aligned} \text{a. } \omega t &= 2\pi f t = 2\pi \frac{40}{\pi} \text{ Hz} \\ &= 80 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\omega_t - \omega_o}{t} = \frac{80 - 0}{5} \\ &= 16 \text{ rad / s}^2 \end{aligned}$$

b.  $\tau = I \cdot \alpha$  dan Silinder pejal ( $I = \frac{1}{2} m R^2$ )

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2} m R^2 \cdot \alpha = \frac{1}{2} \cdot 40 (10^{-1})^2 \cdot 16 \\ &= 320 \times 10^{-2} \\ &= 3,2 \text{ Nm} \end{aligned}$$



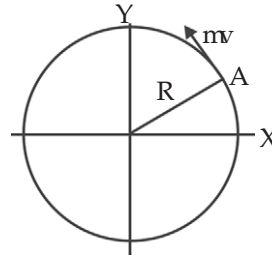
### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Berapa besar momen inersia sebuah cincin tipis yang massanya 12 gram dan diameternya 3,5 cm?
2. Dua partikel pertandingan massanya 1 : 2 dan perbandingan diameternya 4 : 1. Jika kedua partikel berputar bersama-sama, berapa besar perbandingan momen inersianya?
3. Dua benda ruang berbentuk silinder pejal dan bola pejal. Jika massa dan diameter kedua benda tersebut sama. Hitung perbandingan momen inersia silinder terhadap bola pada saat berputar bersama-sama!
4. Sebuah roda yang diameternya 100 cm dengan massa 8 kg berputar 150 putaran/menit. Berapa momen inersia dan tenaga geraknya?

## D. Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Setiap benda yang berputar mempunyai kecepatan sudut. Kecepatan sudut menyebabkan timbulnya momen inersia. Bagaimana hubungan antara momen inersia dan kecepatan sudut? Perhatikan Gambar 7.6! Pada gambar memperlihatkan titik A yang berotasi dengan sumbu putar O. R adalah jarak antara O dan A. Selama berotasi titik A memiliki momentum sebesar  $p = m \times v$ . Hasil perkalian momentum dengan jarak R disebut momentum sudut, dan diberi notasi L.



**Gambar 7.6** Titik A yang berotasi dengan sumbu O dan jari-jari R memiliki momentum  $m \times v$ .

$$L = p \times R$$

$$L = m \times v \times R$$

$$L = m \times \omega \times R \times R$$

$$L = m \times R^2 \times \omega$$

Apabila momentum sudut dihubungkan dengan momen inersia, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$L = I \times \omega$$

Keterangan:

v : kecepatan linear (m/s)

L : momentum sudut ( $\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$ )

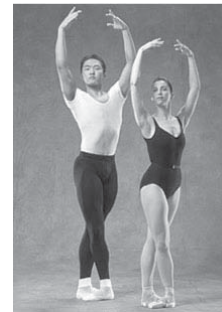
m : massa partikel/titik (kg)

R : jarak partikel ke sumbu putar (m)

$\omega$  : kecepatan sudut (rad/s)

I : momen inersia ( $\text{kg m}^2$ )

Pernahkah Anda melihat seorang pesenam lantai yang sedang beraksi? Pada saat sedang melakukan gerakan berputar, pesenam sering harus mengubah kecepatan putarnya. Coba cermatilah, apa yang dilakukan? Mungkin Anda kurang menyadari, bahwa dengan cara merentangkan tangan saja kecepatan putarannya akan berubah. Mengapa hal ini bisa terjadi?



Sumber: CD Clip Art.

**Gambar 7.7** Atlet senam lantai.

Ingat, pada peristiwa tumbukan antara dua buah benda, berlaku hukum kekekalan momentum. Apabila tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem, maka momentum sistem bersifat kekal. Sebaliknya, jika pada sistem dikenai gaya luar, maka momentum akan berubah. Besar perubahan momentum benda sama dengan impuls benda, yaitu hasil kali antara gaya dan selang waktu ( $F \times \Delta t = \Delta p$ ).

Anda ketahui bahwa persamaan momen gaya dapat ditulis  $\tau = I \times \alpha$ .

Persamaan ini juga dapat ditulis  $\tau = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{dL}{dt}$ . Jika tidak ada momen gaya luar yang bekerja pada sistem ( $\Sigma \tau = 0$ ), maka momentum sudut  $L$  akan konstan. Artinya, momentum sudut adalah kekal atau tetap. Hal inilah yang disebut hukum kekekalan momentum sudut. Hukum kekekalan momentum sudut berbunyi “Jika tidak ada gaya yang memengaruhi pada sistem, momentum sudut sistem adalah tetap”. Hukum tersebut dapat diartikan bahwa momentum sudut sebelum dan sesudah peristiwa adalah tetap.

$$L = L' \text{ atau } I \omega = I' \omega'$$



### CONTOH SOAL

Seorang atlet senam lantai memiliki momen inersia  $4 \text{ kgm}^2$  ketika kedua lengannya telentang dan  $2 \text{ kg m}^2$  ketika merapat ke tubuhnya. Pada saat kedua lengannya terentang, atlet tersebut berputar dengan kelajuan 3 putaran/s. Setelah itu, kedua lengannya dirapatkan ke tubuhnya. Tentukanlah laju putaran atlet ketika kedua lengannya merapat!

Diketahui :  $I = 4 \text{ kgm}^2$   
 $I' = 2 \text{ kg m}^2$   
 $\omega = 3 \text{ putaran/s}$

Ditanyakan :  $\omega' = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} I \omega &= I' \omega' \Rightarrow \omega' = \frac{I\omega}{I'} \\ &= \frac{4 \times 3}{2} \\ &= 6 \text{ putaran/s} \end{aligned}$$



## UJI PEMAHAMAN

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!

1. Bola yang massanya 400 g bergerak dengan kelajuan 36 km/jam. Bola tersebut kemudian dipukul dengan gaya 800 N dan lamanya pemukul menyentuh bola adalah 0,02 detik. Hitunglah kelajuan bolanya jika:
  - a. pukulan searah arah laju bola dan
  - b. pukulan berlawanan arah laju bola!
2. Kecepatan sudut mula-mula sebuah benda yang berputar dengan momen inersia  $50 \text{ kgm}^2$  adalah 80 rad/s. Karena suatu pukulan, kecepatan sudutnya berubah menjadi 200 rad/s dalam waktu 0,6 sekon. Berapa besar gaya pemukul yang bekerja?
3. Silinder pejal dengan massa 2 kg dengan jari-jari 5 cm berputar dengan kecepatan sudut 120 rad/s. Jika gaya sebesar 60 N diberikan melawan arah putaran, maka hitunglah lama waktu untuk menghentikannya!
4. Dua roda P dan Q memiliki momen inersia  $40 \text{ kgm}^2$ . Jika kedua digabung sehingga seporos, maka hitunglah kecepatan sudut gabungannya!

## E. Gerak Menggelinding

Anda telah mempelajari gerak translasi dan gerak rotasi secara sendiri-sendiri. Sekarang, carilah contoh benda yang secara simultan melakukan dua jenis gerak tersebut sekaligus! Benda yang melakukan gerak rotasi dan translasi secara bersamaan disebut menggelinding.

Benda yang melakukan gerak menggelinding memiliki persamaan rotasi ( $\sum \tau = I \times \alpha$ ) dan persamaan translasi ( $\sum F = m \times a$ ). Besarnya energi kinetik yang dimiliki benda menggelinding adalah jumlah energi kinetik rotasi dan energi kinetik translasi.



**Gambar 7.8** Benda yang melakukan gerak translasi dan rotasi sekaligus disebut menggelinding.



Perhatikan Gambar 7.8! Misalkan sebuah silinder pejal bermassa  $m$  dan berjari-jari  $R$  menggelinding sepanjang bidang datar horizontal. Pada silinder diberikan gaya sebesar  $F$ . Berapakah percepatan silinder tersebut jika silinder menggelinding tanpa selip? Jika silinder bergulir tanpa selip, maka silinder tersebut bergerak secara translasi dan rotasi. Pada kedua macam gerak tersebut berlaku persamaan-persamaan berikut.

- Untuk gerak translasi berlaku persamaan:  $F - f = m a$  dan  $N - m g = 0$
- Untuk gerak rotasi berlaku persamaan:  $\tau = I \times \alpha$

Karena silinder bergulir tanpa selip, maka harus ada gaya gesekan. Besarnya gaya gesekan pada sistem ini adalah sebagai berikut.

$$I \alpha = f R \Leftrightarrow f = \frac{I \alpha}{R}$$

$$\text{Jika } \alpha = \frac{a}{R}, \text{ maka } f = \frac{I}{R} \left( \frac{a}{R} \right) = I \left( \frac{a}{R^2} \right)$$

Jika disubstitusikan ke dalam persamaan  $F - f = m a$ , maka persamaanya menjadi seperti berikut.

$$F - I \left( \frac{a}{R^2} \right) = m a \Leftrightarrow a = \frac{F}{m + \frac{I}{R^2}}$$

Karena  $I = \frac{1}{2} m R^2$  maka:

$$a = \frac{F}{m + \frac{\frac{1}{2} m R^2}{R^2}} = \frac{F}{m + \frac{1}{2} m} = \frac{2F}{3m}$$



### CONTOH SOAL

Sebuah bola pejal bermassa 10 kg berjari-jari 50 cm menggelinding di atas bidang datar karena dikenai gaya 14 N. Tentukan momen inersia, percepatan tangensial tepi bola, percepatan sudut bola, gaya gesekan antara bola dengan bidang datar, dan besarnya torsi yang memutar bola!

Diketahui :  $m = 10 \text{ kg}$

$R = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$

$F = 14 \text{ N}$

Ditanyakan: a.  $I = \dots?$

b.  $a = \dots?$

c.  $\alpha = \dots?$

d.  $f_g = \dots?$

e.  $\tau = \dots?$

Jawab :

a. Karena bola pejal, maka

$$I = \left(\frac{2}{5}\right)mR^2 = \left(\frac{2}{5}\right) \times 10 \times (0,5)^2 = 1 \text{ kgm}^2$$

$$\text{b. } a = \frac{F}{m(1+k)}$$

$$= \frac{14}{10\left(1+\frac{2}{5}\right)} = 1 \text{ m/s}^2$$

$$\text{c. } \alpha = \frac{a}{R} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ rad/s}^2$$

$$\text{d. } f_g = \frac{I \alpha}{R} = \frac{1 \times 2}{0,5} = 4 \text{ N}$$

$$\text{e. } \tau = I \alpha = 1 \times 2 = 2 \text{ Nm}$$



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Tabung yang panjangnya 19 cm dan jari-jari 8 cm menggelinding dengan percepatan  $2,4 \text{ m/s}^2$ . Berapakah percepatan sudutnya?
2. Sebuah bola pejal bermassa 10 kg dan berjari-jari 10 cm menggelinding di atas bidang miring  $37^\circ$ . Jika gaya gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah momen inersia, percepatan, percepatan sudut, gaya gesek antara bola dengan lantai, dan torsi yang memutar bola!
3. Silinder yang massanya 12 kg didorong dengan gaya 240 N. Jika jari-jari silinder 20 cm, maka hitunglah percepatan linear yang dialami silinder!

## ● TUGAS



Tujuan : menyelidiki gerak rotasi benda.

Alat dan Bahan : batang kayu dan pemukul.

Langkah Kegiatan :

1. Siapkan sebatang kayu yang panjangnya  $\pm 1$  m!
2. Letakkan kayu tersebut di lantai!
3. Pukul pada salah satu kayu!
4. Amati gerakan kayu, simpulkan jenis gerakan kayu tersebut!
5. Sketsalah gerakan kayu tersebut pada kertas kosong!
6. Cobalah kamu tentukan titik pusat rotasi batang kayu pada saat bergerak!
7. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan ini!

## F. Titik Berat Benda

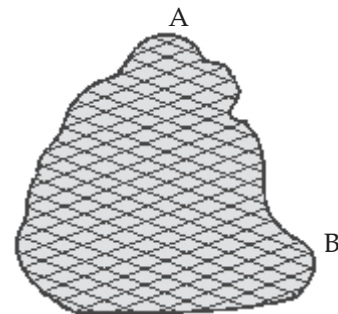


Titik berat merupakan titik tangkap gaya berat benda. Pada bahasan kali ini kita akan mempelajari titik berat pada benda tidak teratur, benda teratur, dan gabungan beberapa benda.

### 1. Titik Berat Benda yang Bentuknya Tidak Teratur

Perhatikan Gambar 7.9! Bagaimana cara menentukan titik beratnya? Untuk dapat menentukan titik berat benda tersebut, coba ikuti langkah-langkah berikut!

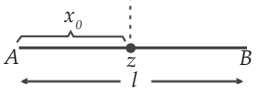
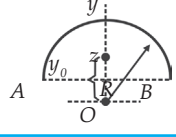
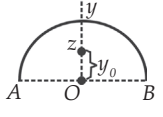
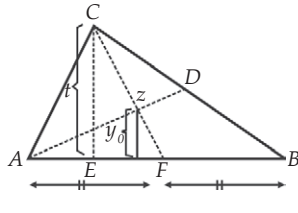
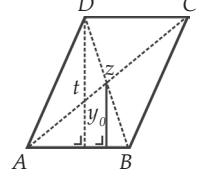
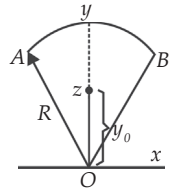
1. Salin Gambar 7.9 pada kertas karton!
2. Tentukan dua buah titik pada bagian tepi benda (misalkan titik A dan titik B)!
3. Gantung benda pada titik A, lukis garis vertikal yang melalui titik A!
4. Gantung benda pada titik B, lukis garis vertikal yang melalui titik B!
5. Tandai perpotongan kedua garis tersebut sebagai titik Z!
6. Titik Z inilah yang merupakan titik berat benda!



**Gambar 7.9** Menentukan titik berat benda yang tidak teratur.

## 2. Titik Berat Benda yang Bentuknya Teratur

Titik berat beberapa benda yang bentuknya teratur, dapat Anda lihat pada tabel berikut!

No	Nama Benda	Gambar Benda	Letak Titik Berat
1.	Garis lurus		$X_0 = 1/2 l$ z : titik tengah garis
2.	Busur Lingkaran		$Y_0 = R \times \frac{\text{tali busur AB}}{\text{busur AB}}$ R : jari-jari lingkaran
3.	Busur setengah		$Y_0 = \frac{4R}{3\pi}$ R : jari-jari lingkaran
4.	Segitiga		$Y_0 = \frac{1}{2} t$ t : tinggi segitiga z : perpotongan garis-garis berat AD dan CF
5.	Jajargenjang, ketupat, bujur sangkar persegi diagonal panjang		$Y_0 = \frac{2}{3} R \frac{\text{tali busur AB}}{\text{busur AB}}$ t : tinggi segitiga z : perpotongan AC dan BD
6.	Jaring lingkaran		$Y_0 = \frac{2}{3} R \frac{\text{tali busur AB}}{\text{busur AB}}$ R : jari-jari lingkaran

### 3. Titik Berat Gabungan Beberapa Benda

#### a. Benda Berdimensi Panjang

Benda berbentuk garis atau berdimensi satu merupakan benda yang lebar dan tebalnya dapat diabaikan sehingga berat benda sebanding dengan panjangnya ( $\ell$ ). Perhatikan Gambar 7.10! Jika dua buah benda berdimensi panjang digabung, maka akan titik berat gabungannya disimbolkan adalah  $Z (X_O, Y_O)$ ,

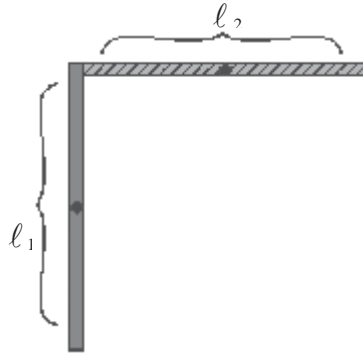
dengan  $X_O = \frac{x_1 \ell_1 + x_2 \ell_2}{\ell_1 + \ell_2}$  dan

$$Y_O = \frac{y_1 \ell_1 + y_2 \ell_2}{\ell_1 + \ell_2}.$$

Apabila yang digabungkan lebih dari dua benda, maka nilai

$$X_O = \frac{\ell_1 x_1 + \ell_2 x_2 + \ell_3 x_3 + \dots + \ell_n x_n}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_n} = \frac{\sum \ell_n x_n}{\sum \ell_n}$$

$$Y_O = \frac{\ell_1 y_1 + \ell_2 y_2 + \ell_3 y_3 + \dots + \ell_n y_n}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_n} = \frac{\sum \ell_n y_n}{\sum \ell_n}$$



**Gambar 7.10** Menentukan titik berat gabungan benda berdimensi panjang.

#### b. Benda Berdimensi Luas

Benda berbentuk luasan atau berdimensi luas merupakan benda yang ketebalannya dapat diabaikan sehingga berat benda sebanding dengan luasnya ( $A$ ). Koordinat titik berat gabungan beberapa benda homogen berbentuk luasan dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X_O = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + \dots + A_n x_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \frac{\sum A_n x_n}{\sum A_n}$$

$$Y_O = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 + \dots + A_n y_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \frac{\sum A_n y_n}{\sum A_n}$$

#### c. Benda Berdimensi Volume

Massa benda berdimensi volume ( $m$ ) dapat ditentukan dari hasil kali massa jenis benda ( $\rho$ ) dengan volume benda ( $V$ ). Koordinat titik pusat massa  $Z (X_O, Y_O)$  pada benda berdimensi volume dapat Anda turunkan dari koordinat titik berat benda.

$$X_o = \frac{\rho_1 V_1 x_1 + \rho_2 V_2 x_2 + \rho_3 V_3 x_3 + \dots + \rho_n V_n x_n}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3 + \dots + \rho_n V_n}$$

Benda homogen memiliki massa jenis yang sama ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$ ) sehingga:

$$\begin{aligned} X_o &= \frac{\rho(V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 + \dots + V_n x_n)}{\rho(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)} \\ &= \frac{V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 + \dots + V_n x_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n} \end{aligned}$$

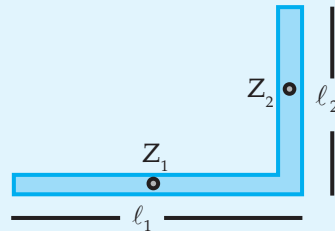
Dengan demikian, koordinat titik berat gabungan beberapa benda homogen berdimensi volume dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} X_o &= \frac{V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 + \dots + V_n x_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n} = \frac{\Sigma V_n x_n}{\Sigma V_n} \\ Y_o &= \frac{V_1 y_1 + V_2 y_2 + V_3 y_3 + \dots + V_n y_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n} = \frac{\Sigma V_n y_n}{\Sigma V_n} \end{aligned}$$

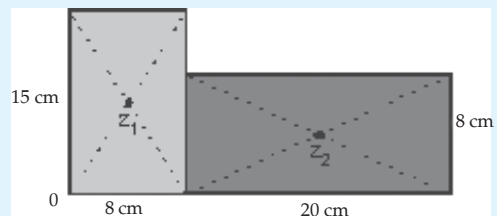


### UJI PEMAHAMAN

1. Perhatikan gambar di samping! Tentukan titik berat gabungan dua benda pada gambar tersebut jika  $\ell_1 = 1,8$  m,  $\ell_2 = 1,2$  m,  $Z_1 = (0,9; 0)$ , dan  $Z_2 = (1,8; 0,6)$ !



2. Perhatikan gambar di samping! Tentukan titik berat gabungan dua benda pada gambar tersebut jika ujung kiri bawah dianggap sebagai titik acuan dan  $Z_1 = (4,7)$ , dan  $Z_2 = (18,4)$ !



3. Carilah contoh manfaat mempelajari titik berat berbagai macam benda pada kehidupan sehari-hari. Misalnya aplikasi dalam teknik-teknik bela diri!

## ● RANGKUMAN

1. Persamaan momen gaya adalah  $\tau = r \times F$ .
2. Persamaan momen inersia adalah  $I = \sum m_i \times R_i^2$ .
3. Persamaan momentum sudut adalah  $L = I \times \omega$ .
4. Hubungan momen gaya dengan momen inersia adalah  $\tau = I \times \alpha$ .
5. Kopel adalah dua gaya sama besar tetapi berlawanan arah yang dipisahkan oleh jarak. Momen kopel dirumuskan  $M = F \times d$ .
7. Bunyi hukum kekekalan momentum sudut adalah "Jika tidak ada gaya yang memengaruhi pada sistem, momentum sudut sistem adalah tetap".
8. Syarat keseimbangan benda tegar adalah  $\sum F_x = 0$  atau  $\sum F_y = 0$  dan  $\sum \tau = 0$ .
9. Ada tiga macam keseimbangan, yaitu keseimbangan stabil, labil, dan netral.

## ● TUGAS PROYEK

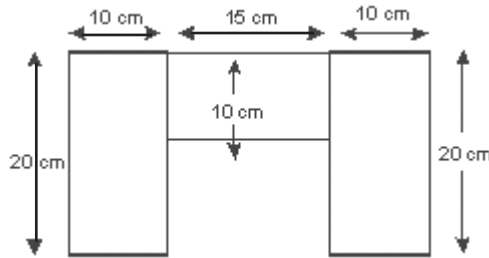
1. Dengan menggunakan teori kesetimbangan yang telah Anda pelajari, rancanglah sebuah mainan yang berupa seekor burung dengan sayap terbuka. Usahakan mainan burung ini dapat dileakkan tanpa jatuh dengan hanya menempelkan paruhnya di ujung batang kerja yang tengah. Presentasikan mainan buatanmu di depan kelas dengan menggunakan analisis fisika. Jika dinilai layak dan menarik, maka buatlah mainan tersebut beberapa buah lagi. Juallah mainan tersebut di pasar atau di pusat keramaian yang lain. Uang hasil penjualan dapat Anda tabung atau untuk keperluan sekolah!
2. Dengan menggunakan kertas karton yang tebal buatlah bangun datar persegi, persegi panjang, lingkaran, dan segitiga sama sisi, masing-masing 2 buah dengan ukuran tidak sama. Gunakan pensil untuk menahan bangun-bangun tersebut sehingga dapat mendarat rata tanpa jatuh dan tandailah tempat tersebut. Adakah hubungan tempat tersebut dengan titik potong diagonalnya. Buatlah kesimpulan berdasarkan kegiatan tersebut dan kumpulkan di meja guru!



## UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!

1. Sebuah tongkat yang panjangnya 2 m dan bermassa 1,5 kg diputar sehingga berkecepatan sudut tetap sebesar 10 rad/s. Hitunglah besar momentum sudutnya jika pusat putarnya berada pada tengah-tengah tongkat atau pada salah satu ujung tongkat!
2. Perhatikan gambar di samping! Dengan menggunakan titik O sebagai acuan, tentukan posisi titik berat gabungan bangun-bangun tersebut!
3. Sebuah silinder pejal berjari-jari 10 cm dan tingginya 10 cm memiliki massa jenis 5. Di atas silinder tersebut diletakkan sebuah kerucut dengan jari-jari 10 cm, tinggi 20 cm, dan massa jenisnya 3. Jika sumbu kedua benda tersebut berimpit dan dianggap sebagai sumbu Y, maka tentukan titik berat gabungannya!
4. Batang homogen AB yang panjangnya 2 m memiliki berat 50 N. Pada ujung B ditahan oleh tali dan ujung A menempel pada dinding. Jika batang AB tepat akan bergeser pada sudut  $45^\circ$  terhadap dinding, maka tentukan gaya gesekan statis antara batang AB dengan dinding di ujung A dan gaya normal yang dimunculkan dinding di titik A!
5. Tangga homogen AB panjangnya 5 m dan massanya 10 kg bersandar dengan ujung B pada dinding dan ujung A di lantai. Saat ujung A membentuk sudut  $45^\circ$  tangga tepat akan menggeser. Tentukan gaya normal di titik A dan di titik B serta gaya gesekan antara ujung A dengan lantai dan antara ujung B dengan dinding!



## REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

# BAB 8

## FLUIDA

### Tujuan Pembelajaran

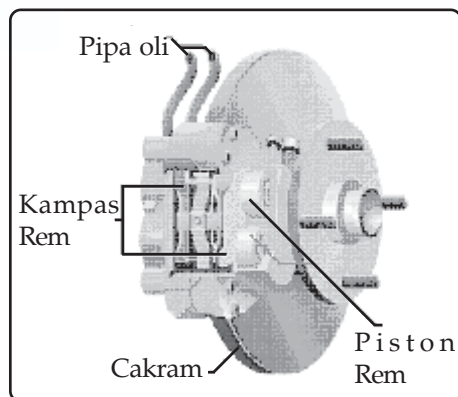
Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu menganalisis, menginterpretasikan, dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan konsep dan hukum-hukum pada fluida statis dan fluida dinamis; serta dapat menggunakannya dalam kehidupan sehari-hari.

### Kata Kunci

- Fluida
- Tekanan
- Viskositas
- Kapilaritas
- Hidrometer
- Kontinuitas

Anda pasti pernah mendengar atau bahkan pernah melihat alat yang disebut “rem hidrolik”. Mengapa dinamakan rem hidrolik? Sebenarnya pada rem ini hanya bagian penekan saja yang menggunakan sistem hidrolik. Kerja kawat penarik digantikan dengan oli rem. Coba perhatikan rem cakram pada sepeda motor! Pada bus atau truk, penggunaan oli rem diganti dengan udara bertekanan. Sistem rem ini sering dikenal sebagai “rem angin”. Oli atau udara pada peristiwa ini dimanfaatkan sesuai sifatnya sebagai zat alir atau fluida.

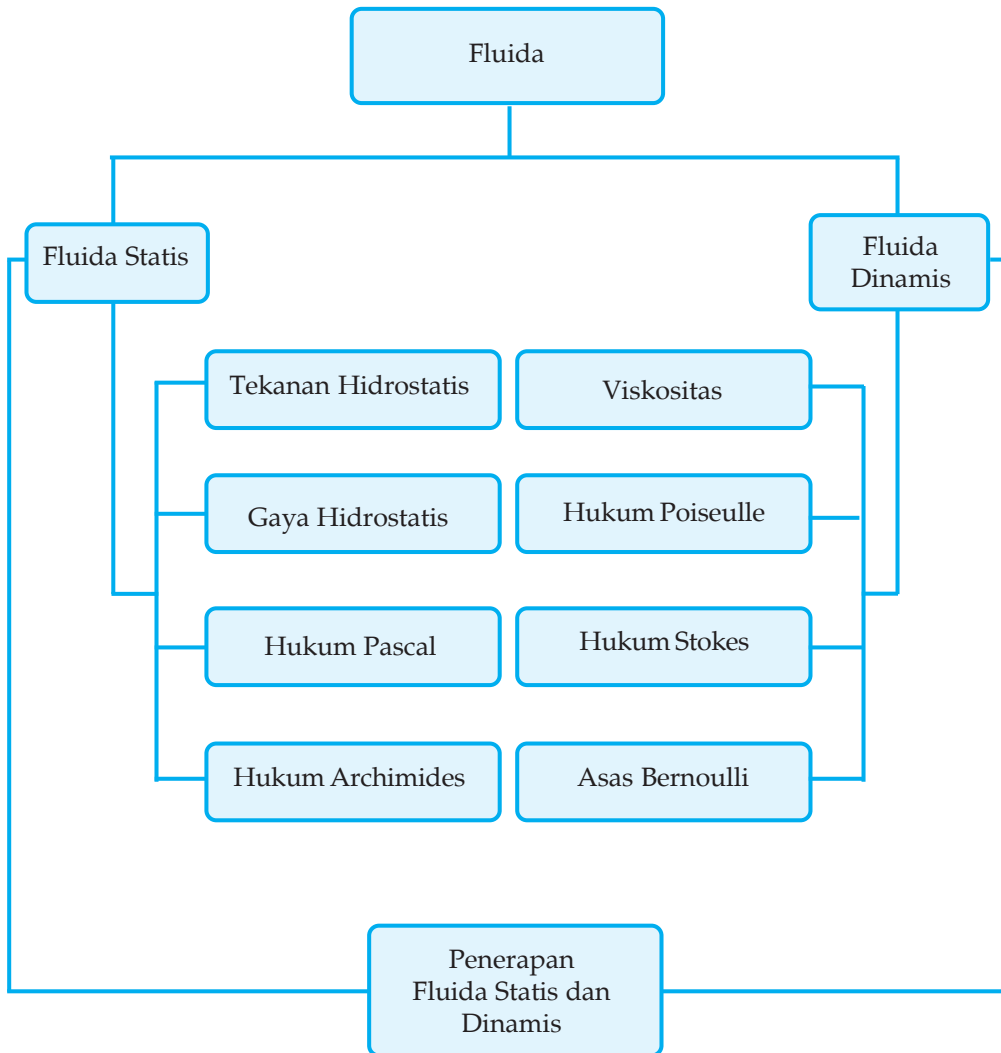
Pada bab ini kita akan membahas fluida dalam kerangka mekanika fluida. Pembahasan materi ini dititikberatkan pada sifat-sifat fisis fluida. Ada dua jenis fluida, yaitu fluida tak mengalir (fluida statis) dan fluida mengalir (fluida dinamis).



Sumber: Encarta Encyclopedia, 2006.

**Gambar 8.1** Rem hidrolik merupakan salah satu contoh penerapan tentang fluida.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini,  
perhatikan peta konsep berikut!



## A. Fluida Statis

Fluida statis adalah fluida yang tidak mengalami perpindahan bagian-bagiannya. Pada keadaan ini, fluida statis memiliki sifat-sifat seperti memiliki tekanan dan tegangan permukaan.

### 1. Tekanan Hidrostatik

Tekanan dalam fisika didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada suatu bidang per satuan luas bidang tersebut. Bidang atau permukaan yang dikenai gaya disebut bidang tekan, sedangkan gaya yang diberikan pada bidang tekanan disebut gaya tekan. Satuan internasional (SI) tekanan adalah pascal (Pa). Satuan ini dinamai sesuai dengan nama ilmuwan Prancis, Blaise Pascal. Secara matematis tekanan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$P = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

P : tekanan (Pa)

F : gaya tekan (N)

A : luas bidang tekan ( $m^2$ )

Untuk memahami tekanan hidrostatik, kita anggap zat terdiri atas beberapa lapisan. Setiap lapisan memberi tekanan pada lapisan di bawahnya, sehingga lapisan bawah akan mendapatkan tekanan paling besar. Karena lapisan atas hanya mendapat tekanan dari udara (atmosfer), maka tekanan pada permukaan zat cair sama dengan tekanan atmosfer.

$$P_h = \frac{F}{A} = \frac{W}{A} = \frac{mg}{A}. \text{ Karena } m = \rho \times V, \text{ maka } P_h = \frac{\rho Vg}{A}.$$

Anda ketahui bahwa volume merupakan hasil perkalian luas alas (A) dengan tinggi (h). Oleh karena itu, persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut.

$$P_h = \frac{\rho g A h}{A} = \rho g h$$

Anda tidak boleh mengukur tekanan udara pada ketinggian tertentu menggunakan rumus ini. Hal ini disebabkan karena kerapatan udara tidak sama di semua tempat. Makin tinggi suatu tempat, makin kecil kerapatan udaranya. Untuk tekanan total yang dialami suatu zat cair pada ketinggian tertentu dapat dicari dengan menjumlahkan tekanan udara luar dengan tekanan hidrostatik.

$$P_{\text{total}} = P_0 + P_h$$

Keterangan:

$P_h$  : tekanan yang dialami zat cair/tekanan hidrostatis (Pa)

$P_0$  : tekanan udara luar (Pa)

$\rho$  : massa jenis zat cair ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  : percepatan gravitasi bumi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$h$  : kedalaman/tinggi titik ukur dari permukaan (m)



### CONTOH SOAL

- Seorang penyelam mampu berada pada kedalaman 40 m di bawah permukaan laut. Jika massa jenis air laut  $1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$  dan percepatan gravitasi  $10 \text{ m}/\text{s}^2$ , maka hitunglah besar tekanan hidrostatis yang dialami penyelam!

Diketahui :  $h = 40 \text{ m}$

$$\rho = 1,2 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1.200 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$g = 10 \text{ m}/\text{s}^2$$

Ditanyakan:  $P_h = \dots ?$

Jawab :

$$P_h = \rho g h$$

$$= 1.200 \cdot 10 \cdot 40$$

$$= 4,8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- Sebuah pipa berbentuk pipa U berisi air dan minyak. Tinggi kolom minyak 20 cm dan tinggi kolom air 10 cm. Jika massa jenis air  $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$ , maka hitunglah massa jenis minyak!

Diketahui :  $h_{\text{minyak}} = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$

$$h_{\text{air}} = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{air}} = 1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Ditanyakan:  $\rho_{\text{minyak}} = \dots ?$

Jawab :

$$P_{\text{minyak}} = P_{\text{air}}$$

$$\rho_{\text{minyak}} \times g \times h_{\text{minyak}} = \rho_{\text{air}} \times g \times h_{\text{air}}$$

$$\rho_{\text{minyak}} \times h_{\text{minyak}} = \rho_{\text{air}} \times h_{\text{air}}$$

$$\rho_{\text{minyak}} \times 0,2 = 1.000 \times 0,1$$

$$\rho_{\text{minyak}} = \frac{100}{0,2} = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$$



## UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal berikut di dalam buku tugas Anda!*

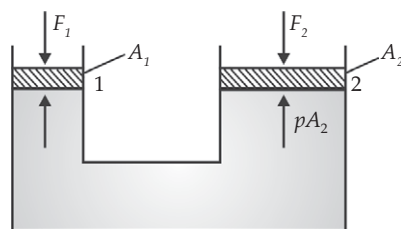
1. Massa jenis separuh benda berbentuk bola adalah  $1,23 \text{ g/cm}^3$ . Jika volume benda tersebut 0,5 liter, maka hitunglah massa benda yang berbentuk bola tersebut jika masih utuh!
2. Berapakah massa sejumlah air yang memenuhi sebuah tabung kaca berdiameter 14 cm dengan ketinggian 25 cm?
3. Sebuah balok kayu massa jenisnya  $0,987 \text{ g/cm}^3$  dengan ukuran  $150 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ . Jika balok diletakkan di lantai, maka tentukan 3 kemungkinan tekanan yang dikerjakan oleh balok ke lantai!
4. Suatu bak penampung air berbentuk kubus dengan tinggi 2 meter. Jika tekanan hidrostatik yang dikerjakan air pada dasar bak penampung  $5.000 \text{ N/m}^2$ , maka hitunglah kedalaman air di bak penampung tersebut!
5. Untuk menentukan massa jenis suatu zat cair digunakan sebuah pipa U dari kaca dengan menggunakan air sebagai pembanding. Jika dari batas kedua zat cair diketahui tinggi air 14 cm dan tinggi zat cair yang akan dicari massa jenisnya 24 cm, maka hitunglah massa jenis zat cair tersebut!
6. Bentuk bangunan dinding selokan atau sungai kecil dibuat trapesium dengan luas bagian bawah lebih sempit dari bagian atasannya. Jelaskan alasan perbedaan luas bagian bawah dan bagian atas tersebut!

## 2. Hukum Pascal

Sebelum membahas lebih lanjut mengenai hukum Pascal, apa yang terjadi jika pada tabung rem hidrolik atau rem angin mengalami kebocoran? Bisakah rem bekerja? Rem tentu tidak dapat berfungsi. Hal ini dikarenakan tekanan yang diberikan tidak akan diteruskan sampai kampas rem. Jadi, sistem rem hidrolik dapat berfungsi jika fluida berada dalam ruang tertutup.

Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan yang diberikan di dalam ruang tertutup diteruskan sama besar ke segala arah. Berdasarkan hukum ini diperoleh prinsip bahwa dengan gaya yang kecil dapat menghasilkan suatu gaya yang lebih besar. Sistem kerja rem hidrolik di atas merupakan salah satu contoh pengaplikasian hukum Pascal. Selain itu, hukum pascal juga dapat di jumpai pada sistem alat pengangkat air, alat pengepres, dongkrak hidrolik, dan drum hidrolik.

Perhatikan Gambar 8.2! Apabila penghisap 1 ditekan dengan gaya  $F_1$ , maka zat cair menekan ke atas dengan gaya  $PA_1$ . Tekanan ini akan diteruskan ke penghisap 2 yang besarnya  $PA_2$ . Karena tekanannya sama ke segala arah, maka didapatkan persamaan sebagai berikut.



**Gambar 8.2** Prinsip kerja dongkrak hidrolik.

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Rightarrow F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2$$

Jika penampang penghisap dongkrak hidrolik berbentuk silinder dengan diameter tertentu, maka persamaan di atas dapat pula dinyatakan sebagai berikut.

Karena  $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$  dan  $A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ , maka  $F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2 = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 F_2$

Keterangan:

$F_1$  : gaya pada piston pertama

$F_2$  : gaya pada piston kedua

$A_1$  : luas penampang piston pertama

$A_2$  : luas penampang piston kedua

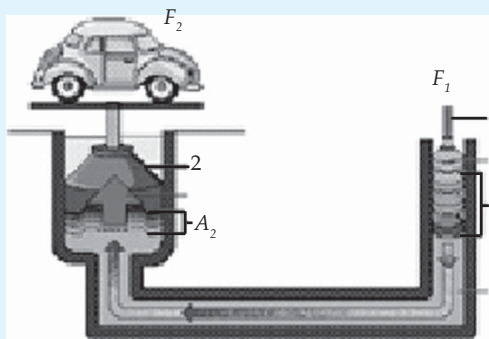
$d_1$  : diameter piston pertama

$d_2$  : diameter piston kedua



### CONTOH SOAL

Perhatikan gambar di samping! Suatu alat pengangkat mobil (dongkrak hidrolik) terdiri atas 2 tabung yang berhubungan. Kedua tabung yang mempunyai diameter berbeda ini ditutup masing-masing



Sumber: Encarta Encyclopedia, 2006.

dengan sebuah pengisap. Tabung diisi penuh minyak. Pada tabung besar diletakkan mobil yang hendak diangkat. Ketika pengisap pada tabung kecil diberi gaya, ternyata mobil terangkat ke atas. Jika berat mobil 3 ton, diameter pengisap tabung besar 25 cm dan tabung kecil 5 cm, serta  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , maka hitunglah gaya yang harus diberikan agar mobil terangkat naik!

Diketahui :  $m_b = 3 \text{ ton} = 3.000 \text{ kg}$

$$d_1 = 25 \text{ cm}$$

$$d_2 = 5 \text{ cm}$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanyakan:  $F_1 = \dots?$

Jawab:

Gaya kedua pada sistem ini adalah gaya berat mobil. Oleh karena itu, besarnya  $F_2$  adalah:  $F_2 = m \times g = 3.000 \times 10 = 30.000 \text{ N}$

$$F_1 = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 F_2$$

$$= \frac{5^2}{25^2} 30.000$$

$$= 1.200 \text{ N}$$

Jadi, gaya yang harus diberikan agar mobil terangkat sebesar 1.200 N.



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal berikut dengan benar di dalam buku tugas Anda!*

1. Suatu bejana Pascal luas penampangnya  $19 \text{ cm}^2$  dan  $114 \text{ cm}^2$ . Jika penampang yang kecil diberi gaya 125 N, maka hitunglah gaya maksimum yang mampu ditahan pada penampang yang besar!
2. Perbandingan jari-jari suatu bejana Pascal adalah 1 : 5. Jika pada bagian yang besar diberi beban 1.500 N, maka hitunglah berapa gaya yang harus diberikan pada bagian yang kecil supaya dapat menahan beban tersebut!
3. Gaya sebesar 59 N pada penampang kecil suatu bejana Pascal dapat menahan benda sampai 3.776 N. Jika diameter penampang kecil 7,5 cm, maka hitunglah diameter penampang besar!



### 3. Hukum Archimedes

Saat kita memindahkan batu di dalam air, tentu terasa lebih ringan bila dibandingkan saat memindahkan batu di udara/darat meskipun batu yang dipindahkan sama. Mengapa demikian? Untuk mengetahuinya lakukanlah tugas berikut!

#### TUGAS



Tujuan : Anda dapat memahami gaya ke atas dalam zat cair.

Alat dan Bahan : Neraca pegas, dua buah balok yang berbeda, gelas berpancur, dan gelas ukur.

Langkah Kerja :

1. Isilah gelas berpancur dengan air sampai permukaan air tepat berada di bibir bawah lubang pancur!
2. Letakkan gelas ukur di bawah pancuran!
3. Timbanglah berat balok di udara ( $w_u$ ), kemudian timbanglah berat balok di air ( $w_a$ ) dengan menggunakan neraca pegas, dan catatlah hasilnya!
4. Timbanglah massa air yang tumpah ( $m_c$ ), kemudian kalikan dengan percepatan gravitasi!
5. Ulangi langkah 3 dan 4 dengan menggunakan balok yang berbeda!
6. Tulislah kesimpulan Anda dalam buku tugas!

Saat benda dicelupkan ke dalam zat cair, sesungguhnya berat benda tersebut tidak berkurang. Gaya tarik bumi yang bekerja pada benda tetap sama. Namun, zat cair mengerjakan gaya yang arahnya berlawanan dengan gaya gravitasi sehingga berat benda seakan-akan berkurang.

Besarnya gaya ke atas yang dikerjakan air pada benda sebanding dengan berat air yang ditumpahkan oleh balok. Artinya, suatu benda yang dicelupkan sebagian atau seluruhnya ke dalam zat cair mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat zat cair yang dipindahkan oleh benda tersebut. Pernyataan ini dikenal sebagai *hukum Archimedes*. Secara matematis hukum Archimedes dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}w_u - w_a &= w_c \\F_a &= w_c \\F_a &= m_c \times g\end{aligned}$$

$$F_a = \rho_c \times V \times g$$

Keterangan:

$F_a$  : gaya Archimedes

$w_u$  : berat balok di udara

$w_a$  : berat balok di dalam zat cair

$w_c$  : berat zat cair yang ditumpahkan (N)

$m_c$  : massa zat cair yang ditumpahkan (kg)

$\rho_c$  : massa jenis zat cair ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  : volume benda yang tercelup ( $\text{m}^3$ )

$g$  : percepatan gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ )



### CONTOH SOAL

Sebuah besi yang volumenya  $0,02 \text{ m}^3$  tercelup seluruhnya di dalam air. Jika massa jenis air  $10^3 \text{ kg/m}^3$ , maka hitunglah gaya ke atas yang dialami besi tersebut!

Diketahui :  $V = 0,02 \text{ m}^3$

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanyakan:  $F_a = \dots?$

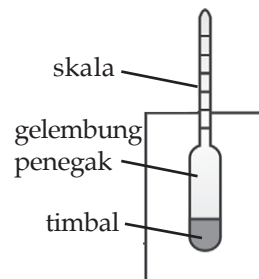
Jawab :

$$\begin{aligned} F_a &= \rho_c \times V \times g \\ &= 10^3 \times 10 \times 0,02 \\ &= 200 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi, gaya ke atas yang di alami besi sebesar 200 N.

Beberapa penerapan hukum Archimides dalam kehidupan sehari-hari, antara lain, pada hidrometer, kapal selam, dan kapal laut.

- a. **Hidrometer.** Hidrometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur massa jenis zat cair. Hidrometer terbuat dari tabung kaca yang didesain sedemikian rupa, sehingga saat dicelupkan ke dalam zat cair terapung tegak. Hidrometer terdiri atas tiga bagian, yaitu bagian bawah hidrometer yang diberi beban butiran timbal agar tabung kaca berdiri tegak di dalam zat cair, bagian tengah yang lebih besar dan disebut gelembung penegak, serta bagian atas berupa skala berat jenis.



**Gambar 8.3** Bagian-bagian hidrometer..

Tangkai tabung kaca (gelembung penegak) hidrometer didesain supaya perubahan kecil dalam berat benda yang dipindahkan (sama artinya dengan perubahan kecil dalam massa jenis zat cair) menghasilkan perubahan besar pada kedalaman tangki yang tercelup di dalam zat cair. Artinya perbedaan bacaan pada skala untuk berbagai jenis zat cair menjadi lebih jelas.

- b. **Kapal Selam.** Kapal selam memiliki alat pengatur yang dinamakan tangki pengapung. Pada saat tangki pengapung kosong, kapal selam terapung. Untuk menyelam, tangki pengapung dimuati air. Dan saat kapal ingin kembali ke permukaan, tangki pengapung dikosongkan kembali dengan cara memompakan udara masuk ke dalamnya.



Sumber : Encarta Eclycopedia, 2006.

**Gambar 8.4** Kapal selam merupakan contoh penerapan hukum Archimedes.

- c. **Kapal Laut.** Saat kalian meletakkan sepotong besi pada bejana berisi air, besi akan tenggelam. Namun, mengapa kapal laut yang massanya sangat besar tidak tenggelam? Bagaimana konsep fisika dapat menjelaskannya? Agar kapal laut tidak tenggelam badan kapal harus dibuat berongga. Hal ini bertujuan agar volume air laut yang dipindahkan oleh badan kapal menjadi lebih besar. Berdasarkan persamaan besarnya gaya ke atas sebanding dengan volume zat cair yang dipindahkan, maka gaya ke atas yang diterima kapal menjadi sangat besar. Gaya ke atas inilah yang mampu melawan berat kapal, sehingga kapal tetap dapat mengapung di permukaan laut.



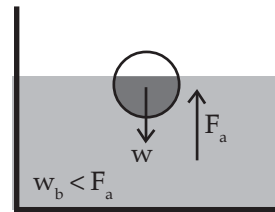
### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal dibawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Sebuah batu yang massanya 50 kg dan volumenya  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  terletak di dasar sungai. Jika  $g = 10 \text{ m/s}^2$  dan  $\rho_{\text{air}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ , maka hitunglah gaya yang diperlukan untuk mengangkat batu!
2. Sepotong kaca beratnya di udara 30 N. Saat dicelupkan ke dalam air beratnya menjadi 20 N. Jika massa jenis air  $1.000 \text{ kg/m}^3$ , maka hitunglah massa jenis kaca tersebut!

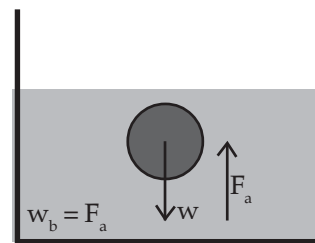
Selain dapat diterapkan dalam kehidupan sehari-hari, adanya hukum Archimedes menyebabkan benda yang dimasukkan ke dalam akan mengalami tiga kemungkinan, yaitu terapung, melayang, dan tenggelam.

a. **Benda Terapung.** Benda dikatakan terapung dalam zat cair jika tidak seluruh bagian benda tercelup dalam zat cair. Hal ini terjadi karena massa jenis benda lebih kecil daripada massa jenis zat cair ( $\rho_b < \rho_c$ ), sehingga berat benda juga lebih kecil daripada gaya Archimedes ( $w_b < F_a$ ). Contoh peristiwa terapung, antara lain, plastik atau kayu yang dimasukkan ke dalam air.



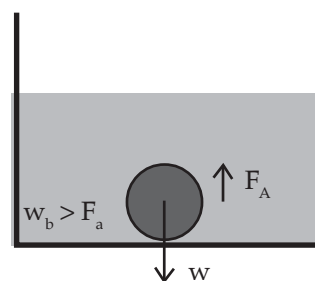
**Gambar 8.5** Mekanisme benda terapung.

b. **Benda Melayang.** Benda dikatakan melayang dalam zat cair apabila keseluruhan permukaan benda tercelup dalam zat cair dan benda diam (tidak jatuh ke bawah tetapi juga tidak muncul ke permukaan). Kondisi ini dapat terjadi karena massa jenis benda sama dengan massa jenis zat cair ( $\rho_b = \rho_c$ ), sehingga berat benda menjadi sama dengan gaya Archimedes ( $w_b = F_a$ ). Dengan kata lain, berat benda di dalam zat cair sama dengan nol. Contoh peristiwa melayang adalah ikan-ikan di dalam air.



**Gambar 8.6** Mekanisme benda melayang.

c. **Benda Tenggelam.** Benda dikatakan tenggelam dalam zat cair apabila benda jatuh ke bawah/dasar wadah saat dimasukkan ke dalam zat cair tersebut. Hal ini terjadi karena massa jenis benda lebih besar daripada massa jenis zat cair ( $\rho_b > \rho_c$ ), sehingga berat benda juga lebih besar daripada gaya Archimedes ( $w_b > F_a$ ). Contoh peristiwa tenggelam, antara lain, batu dan yang dimasukkan ke dalam air.



**Gambar 8.7** Mekanisme benda tenggelam.



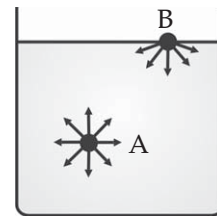
## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal berikut di dalam buku tugas Anda!

1. Ke dalam suatu zat cair dimasukkan sebuah benda yang memiliki massa 120 g dan volume  $100 \text{ cm}^3$ . Berapa besar gaya ke atas dari air yang dialami benda tersebut?
2. Jika suatu benda diletakkan di dalam zat cair, kapan benda akan terapung, melayang atau tenggelam?
3. Benda berbentuk kubus dengan panjang rusuk 30 cm dan massa 21.600 g dimasukkan ke dalam air. Berapa besar gaya ke atas yang dialami benda tersebut?
4. Seongkah es yang memiliki volume  $9.000 \text{ cm}^3$  dan massa jenis  $0,7 \text{ g/cm}^3$  dimasukkan ke dalam air. Berapa bagian volume es yang tercelup dan yang muncul di atas permukaan air?
5. Bagaimanakah prinsip kerja galangan kapal yang digunakan untuk memperbaiki kapal-kapal yang mengalami kerusakan?

### 4. Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan suatu cairan berhubungan dengan garis gaya tegang yang dimiliki permukaan cairan tersebut. Gaya tegang ini berasal dari gaya tarik kohesi (gaya tarik antara molekul sejenis) molekul-molekul cairan. Perhatikan Gambar 8.8! Molekul A (di dalam cairan) mengalami gaya kohesi dengan molekul-molekul di sekitarnya dari segala arah, sehingga molekul ini berada pada keseimbangan (resultan gaya nol). Namun, molekul B (di permukaan) tidak demikian. Molekul ini hanya mengalami kohesi dari partikel di bawah dan di sampingnya saja. Resultan gaya kohesi pada molekul ini ke arah bawah (tidak nol). Resultan gaya ke bawah akan membuat permukaan cairan sekecil-kecilnya. Akibatnya, permukaan cairan menegang seperti selaput yang tipis. Keadaan ini dinamakan tegangan permukaan.



**Gambar 8.8** Tegangan permukaan pada zat cair.

Gejala-gejala yang berkaitan dengan tegangan permukaan, antara lain, air yang keluar dari pipet berupa tetesan berbentuk bulat-bulat; pisau silet yang diletakkan di permukaan air secara hati-hati dapat mengapung; serangga air dapat berjalan di permukaan air; kenaikan air pada pipa kapiler; dan terbentuknya buih dan gelembung air sabun.

Tegangan permukaan suatu zat cair didefinisikan sebagai gaya tiap satuan panjang. Jika pada suatu permukaan sepanjang  $l$  bekerja gaya sebesar  $F$  yang arahnya tegak lurus pada  $l$  dan  $\gamma$  menyatakan tegangan permukaan, maka persamaannya adalah sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

Keterangan:

$F$  : gaya (N)

$l$  : panjang permukaan (m)

$\gamma$  : tegangan permukaan (N/m)



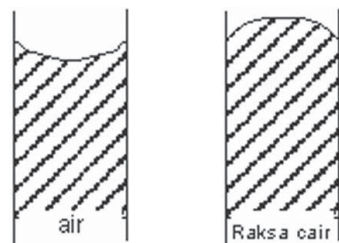
### UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal berikut di dalam buku tugas Anda!

1. Besaran apakah yang berpengaruh pada suatu zat cair, misalnya air, sehingga serangga dapat berjalan di atasnya?
2. Sebuah lempeng logam tipis yang massanya 5 gram dengan luas  $10 \text{ cm}^2$  dapat mengapung di atas permukaan air. Jika dalamnya zat cair yang digunakan adalah 2 meter, maka berapa besar tegangan permukaan zat cair tersebut?

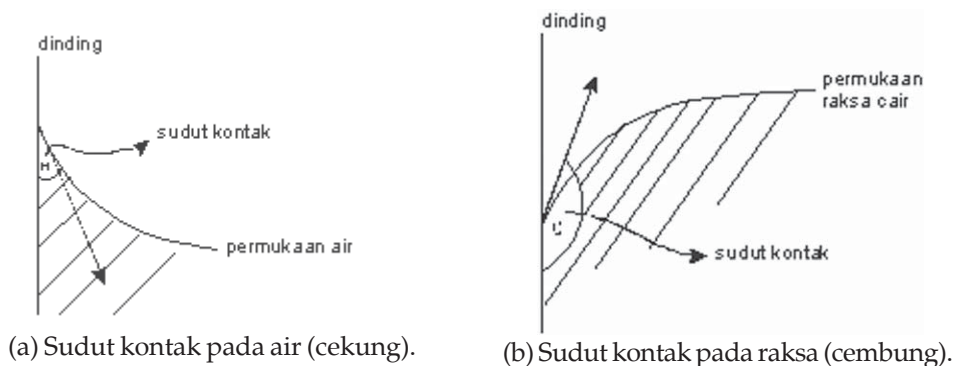
## 5. Sudut Kontak

Apakah yang dimaksud dengan sudut kontak? Perhatikan bentuk permukaan zat cair yang berada dalam tabung pada Gambar 8.9! Apabila Anda menuangkan raksa ke dalam suatu tabung kaca dan air pada tabung kaca lainnya, kemudian Anda amati bentuk permukaannya. Terlihat bahwa pada air terjadi bentuk permukaan cekung dan pada raksa terjadi bentuk permukaan cembung. Jika pada lengkungan air atau raksa Anda tarik garis lurus, maka garis itu akan membentuk sudut terhadap dinding vertikal tabung kaca. Sudut tersebut dinamakan sudut kontak. Jadi, *sudut kontak* adalah sudut yang dibentuk antara permukaan zat cair dengan permukaan dinding pada titik persentuhan zat cair dengan dinding.



**Gambar 8.9** Bentuk permukaan air dan raksa dalam tabung.

Pada bentuk permukaan cekung sudut kontakya lancip (lebih kecil dari  $90^\circ$ ). Sedangkan pada permukaan cembung sudut kontakya tumpul (lebih besar dari  $90^\circ$ ). Perhatikan Gambar 8.10!



**Gambar 8.10** Sudut kontak pada permukaan cekung dan cembung.



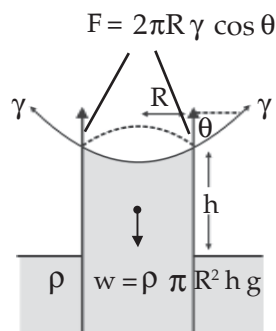
### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal berikut di dalam buku tugas Anda!*

1. Kapan sudut kontak suatu zat cair di dalam bejana akan tumpul dan kapan pula akan lancip ?
2. Apakah hubungan antara sudut kontak dengan basahnya dinding tempat zat cair ?

## 6. Gejala Kapilaritas

Kapilaritas adalah peristiwa naik turunnya zat cair di dalam pipa kapiler (pipa sempit). Perhatikan Gambar 8.11! Pada zat cair yang mengalami meniskus cekung, tegangan permukaan menarik pipa ke arah bawah karena tidak seimbang oleh gaya tegangan permukaan yang lain. Sesuai dengan hukum III Newton tentang aksi reaksi, pipa akan melakukan gaya yang sama besar pada zat cair, tetapi dalam arah berlawanan. Gaya inilah yang menyebabkan zat cair naik. Zat cair berhenti naik ketika berat kolom zat cair yang naik sama dengan gaya ke atas yang dikerjakan pada zat cair ( $w = F$ ).



**Gambar 8.11** Analisis gejala kapiler.

Jika massa jenis zat cair adalah  $\rho$ , tegangan permukaan  $\gamma$ , sudut kontak  $\theta$ , kenaikan zat cair setinggi  $h$ , dan jari-jari pipa kapiler adalah  $R$ , maka berat zat cair yang naik adalah  $w = m g = \rho V g = \rho \pi R^2 h g$ . Komponen gaya vertikal yang menarik zat cair sehingga naik setinggi  $h$  adalah  $F = (\gamma \cos \theta)(2\pi R) = 2\pi R \gamma \cos \theta$ .

Jika nilai  $F$  Anda ganti dengan  $\rho \pi R^2 h g$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$\rho \pi R^2 h g = 2\pi R \gamma \cos \theta$$

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g R}$$

Keterangan:

$h$  : kenaikan/penurunan zat cair dalam pipa (m)

$\gamma$  : tegangan permukaan N/m

$\theta$  : sudut kontak (derajat)

$\rho$  : massa jenis zat cair ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$R$  : jari-jari pipa (m)



### CONTOH SOAL

Sebuah pipa kapiler dengan jari-jari 1 mm dimasukkan vertikal ke dalam air yang memiliki massa jenis  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  dan tegangan permukaan  $1 \text{ N}/\text{m}$ . Jika sudut kontak  $60^\circ$  dan percepatan gravitasi  $g = 10 \text{ m}/\text{s}^2$ , maka tentukan besarnya kenaikan permukaan air pada dinding pipa kapiler!

Diketahui :  $R = 1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$

$\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$

$\gamma = 1 \text{ N}/\text{m}$

$\theta = 60^\circ$

$g = 10 \text{ m}/\text{s}^2$

Ditanyakan:  $h = \dots?$

Jawab :

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g R} = \frac{2 \times 1 \cos 60}{1.000 \times 10 \times 10^{-3}} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}.$$

Jadi, permukaan air pada pipa kapiler naik sebesar 10 cm.





## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal berikut dengan benar di dalam buku tugas Anda!

1. Pipa kapiler dengan jari-jari 0,5 mm dimasukkan secara tegak lurus ke dalam zat cair yang massa jenisnya  $0,8 \text{ g/cm}^3$ . Setelah kedudukan setimbang, ternyata zat cair dalam pipa naik 2 cm dengan sudut kontak  $10^\circ$ . Hitung gaya tegangan permukaan air di dinding pipa kapiler tersebut!
2. Pipa kapiler dengan jari-jari 0,002 cm dimasukkan ke dalam air yang mempunyai tegangan permukaan  $0,08 \text{ N/m}$ . Jika sudut kontaknya dianggap sama dengan nol, maka berapakah tinggi air di dalam pipa kapiler tersebut?

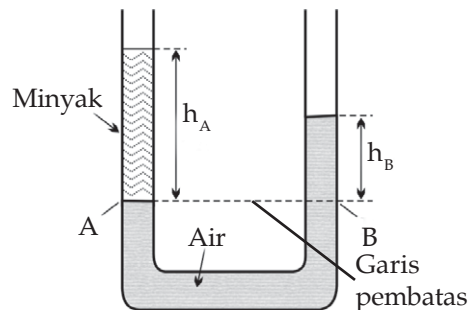
## 7. Bejana Berhubungan

Bejana berhubungan adalah dua atau lebih bejana yang bagian atasnya terbuka, sedangkan bagian bawahnya berhubungan satu dengan yang lain. Apabila bejana berhubungan berisikan satu jenis zat cair dan dalam keadaan setimbang, maka permukaan zat cair akan terletak pada satu bidang datar. Pernyataan tersebut merupakan hukum I bejana berhubungan. Pernyataan “*permukaan zat cair terletak pada satu bidang datar*” mempunyai arti bahwa di setiap permukaan zat cair pada bejana berhubungan memiliki tekanan hidrostatik yang sama.

Tetapi, jika bejana berhubungan diisi dua macam zat cair, misalnya, air dan minyak, maka permukaan zat cair pada bejana berhubungan menjadi tidak sama. Hal ini disebabkan air dan minyak tidak dapat bercampur sehingga timbul garis pembatas antara air dan minyak.

Apabila kita tarik garis mendatar dari garis pembatas antara minyak dan air (garis AB) dan garis ini kita jadikan pangkal untuk mengukur kedalaman minyak dan air pada bejana berhubungan (perhatikan Gambar 8.13!), maka akan sesuai dengan hukum II bejana berhubungan.

Hukum II bejana berhubungan menyatakan bahwa “*Apabila di dalam bejana berhubungan yang berbentuk huruf U (pipa U) terdapat*



**Gambar 8.12** Bejana berhubungan yang diisi dua jenis zat cair

dua macam zat cair yang tidak dapat bercampur, maka tinggi zat cair di atas garis setimbang pada kedua kaki bejana berbanding terbalik dengan massa jenis zat cair masing-masing. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}P_a &= P_b \\P_a \times g \times h_a &= P_b \times g \times h_b \\ \rho_a \times h_a &= \rho_b \times h_b \\ \frac{h_a}{h_b} &= \frac{\rho_b}{\rho_a}\end{aligned}$$

Keterangan:

$h_a$  : tinggi permukaan zat A dari bidang batas (m)

$h_b$  : tinggi permukaan zat B dari bidang batas (m)

$\rho_a$  : massa jenis zat A ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_b$  : massa jenis zat B ( $\text{kg/m}^3$ )



### UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal berikut dengan benar di dalam buku tugas Anda!

1. Sebutkan beberapa syarat yang harus dipenuhi agar ketinggian zat cair pada kaki-kaki bejana berhubungan sama!
2. Sebuah pipa U diisi air dan minyak. Jika tinggi minyak 20 cm dan tinggi air 18 cm, maka berapakah massa jenis minyak yang digunakan?
3. Dua buah zat cair dimasukkan ke dalam pipa U sehingga tingginya 12 cm dan 20 cm. Jika massa jenis zat cair yang besar adalah  $0,12 \text{ g/cm}^3$ , maka berapakah massa jenis zat cair yang satunya lagi?

## B. FLUIDA DINAMIS

Fluida dinamis adalah fluida yang mengalami perpindahan bagian-bagiannya. Pokok-pokok bahasan yang berkaitan dengan fluida bergerak, antara lain, viskositas, persamaan kontinuitas, hukum Bernoulli yang membahas tekanan pada fluida yang bergerak, dan penerapan hukum Bernoulli.

## 1. Viskositas (Kekentalan)

Viskositas merupakan ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida. Makin besar viskositas suatu fluida, makin sulit suatu fluida mengalir dan makin sulit suatu benda bergerak di dalam fluida tersebut. Viskositas zat cair dapat ditentukan secara kuantitatif dengan besaran yang disebut *koefisien viskositas* ( $\eta$ ). Satuan SI untuk koefisien viskositas adalah  $\text{Ns/m}^2$  atau pascal sekon ( $\text{Pa s}$ ).

Apabila suatu benda bergerak dengan kelajuan  $v$  dalam suatu fluida kental yang koefisien viskositasnya  $\eta$ , maka benda tersebut akan mengalami gaya gesekan fluida sebesar  $F_s = k \eta v$ . dengan  $k$  adalah konstanta yang bergantung pada bentuk geometris benda. Berdasarkan perhitungan laboratorium, pada tahun 1845, Sir George Stoker menunjukkan bahwa untuk benda yang bentuk geometrisnya berupa bola nilai  $k = 6\pi R$ . Bila nilai  $k$  dimasukkan ke dalam persamaan, maka diperoleh persamaan yang dikenal sebagai *hukum Stokes*.

$$F_s = 6\pi \eta Rv$$

Keterangan:

$F_s$  : gaya gesekan stokes (N)

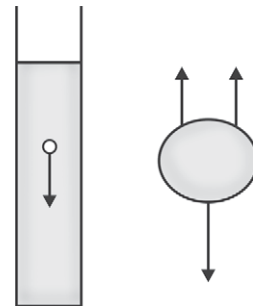
$\eta$  : koefisien viskositas fluida ( $\text{Pa s}$ )

$R$  : jari-jari bola (m)

$v$  : kelajuan bola (m/s)

Perhatikan Gambar 8.13! Sebuah bola dijatuhkan dalam sebuah fluida. Gaya-gaya yang bekerja pada bola adalah gaya berat  $w$ , gaya apung  $F_a$ , dan gaya lambat akibat viskositas atau gaya stokes  $F_s$ . Ketika dijatuhkan, bola bergerak dipercepat. Namun, saat kecepatannya bertambah gaya stokesnya juga bertambah. Akibatnya, pada suatu saat bola akan mencapai keadaan seimbang sehingga bergerak dengan kecepatan konstan. Kecepatan ini disebut kecepatan terminal.

Pada kecepatan terminal, resultan yang bekerja pada bola sama dengan nol. Misalnya sumbu vertikal ke atas sebagai sumbu positif, maka pada saat kecepatan terminal tercapai berlaku persamaan berikut.



**Gambar 8.13** Gaya-gaya yang bekerja pada benda yang bergerak dalam fluida.

$$\begin{aligned}\Sigma F &= 0 \\ F_a + F_s &= w \\ \rho_f V_b g + 6\pi\eta R v_T &= \rho_b V_b g \\ 6\pi\eta R v_T &= \rho_b V_b g - \rho_f V_b g \\ 6\pi\eta R v_T &= g V_b (\rho_b - \rho_f)\end{aligned}$$

$$v_T = \frac{g V_b (\rho_b - \rho_f)}{6\pi\eta R}$$

Untuk benda berbentuk bola seperti pada Gambar 8.13, persamaanya menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned}v_T &= \frac{g \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) (\rho_b - \rho_f)}{6\pi\eta R} \\ &= \frac{2}{9} \frac{R^2 g}{\eta} (\rho_b - \rho_f)\end{aligned}$$

Keterangan:

$v_T$  : kecepatan terminal (m/s)

$\rho_b$  : massa jenis bola (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_f$  : massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)



### CONTOH SOAL

Sebuah bola besi yang berjari-jari 0,2 cm ( $\rho_b = 5.000 \text{ kg/m}^3$ ) dijatuhkan ke dalam sebuah drum yang berisi minyak. Jika koefisien viskositas minyak  $\eta = 11 \times 10^{-2} \text{ kg/ms}$ , maka hitunglah kecepatan terminalnya!

Diketahui :  $R = 0,2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$\rho_f = 900 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_b = 5.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta = 11 \times 10^{-2} \text{ kg/ms}$$

Ditanyakan:  $v_T = \dots?$

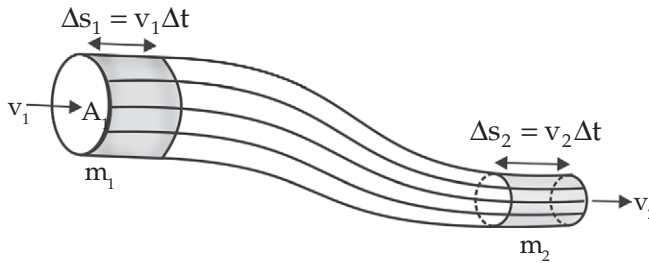
Jawab :

$$\begin{aligned}v_T &= \frac{2 R^2 g}{9 \eta} (\rho_b - \rho_f) \\&= \frac{2 (2 \times 10^{-3})^2 10}{9 (11 \times 10^{-2})} (5.000 - 900) \\&= 0,165 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Jadi, kecepatan terminal bola besi sebesar 0,165 m/s.

## 2. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas menghubungkan kecepatan fluida di suatu tempat dengan tempat lain. Perhatikan Gambar 8.14!



**Gambar 8.14** Debit fluida yang masuk sama dengan yang keluar.

Misalkan terdapat suatu tabung alir seperti tampak pada Gambar 8.14. Air masuk dari ujung kiri dengan kecepatan  $v_1$  dan keluar di ujung kanan dengan kecepatan  $v_2$ . Jika kecepatan fluida konstan, maka dalam interval waktu  $\Delta t$  fluida telah menempuh jarak  $\Delta s_1 = v_1 \Delta t$ . Jika luas penampang tabung kiri  $A_1$ , maka massa pada daerah yang diarsir adalah  $\Delta m_1 = \rho_1 A_1 \Delta s_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t$ . Demikian juga untuk fluida yang terletak di ujung kanan tabung, massanya pada daerah yang diarsir adalah  $\Delta m_2 = \rho_2 A_2 \Delta s_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$ . Karena alirannya lunak (steady) dan massa konstan, maka massa yang masuk penampang  $A_1$  harus sama dengan massa yang masuk penampang  $A_2$ . Oleh karena itu, persamaannya menjadi  $\Delta m_1 = \Delta m_2$ . Persamaan ini dikenal dengan nama *persamaan kontinuitas*. Karena fluida inkompresibel (massa jenisnya tidak berubah), maka persamaan menjadi seperti berikut.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Menurut persamaan kontinuitas, perkalian luas penampang dan kecepatan fluida pada setiap titik sepanjang suatu tabung alir adalah konstan. Persamaan di atas menunjukkan bahwa kecepatan fluida berkurang ketika melewati pipa lebar dan bertambah ketika melewati pipa sempit. Perkalian antara luas penampang dan volume fluida ( $A \times V$ ) dinamakan laju aliran atau fluks volume (dimensinya volume/waktu). Banyak orang menyebut ini dengan debit ( $Q$  = jumlah fluida yang mengalir lewat suatu penampang tiap detik). Jika  $V$  merupakan volume fluida yang mengalir dalam waktu  $t$ , maka secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$Q = A \times V = V/t$$



### CONTOH SOAL

Pada sebuah sungai bawah tanah air mengalir dari hulu ke hilir. Kita anggap sungai berbentuk lingkaran dengan diameter bagian hulu sebesar 6 m dan bagian hilir 10 m. Jika kelajuan aliran air pada sungai bagian hulu sebesar 10 m/s, maka hitunglah kelajuan aliran air pada sungai bagian hilir!

Diketahui :  $d_1 = 10 \text{ m}$   
 $d_2 = 6 \text{ m}$   
 $v_2 = 10 \text{ m/s}$

Ditanyakan:  $v_2 = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} A_1 v_1 &= A_2 v_2 \Rightarrow v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} \\ &= \frac{\pi d_1^2}{\pi d_2^2} v_1 \\ &= \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1 \\ &= \left( \frac{6}{10} \right)^2 10 \\ &= 3,6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi, kelajuan aliran air di sungai bagian hilir sebesar 3,6 m/s.



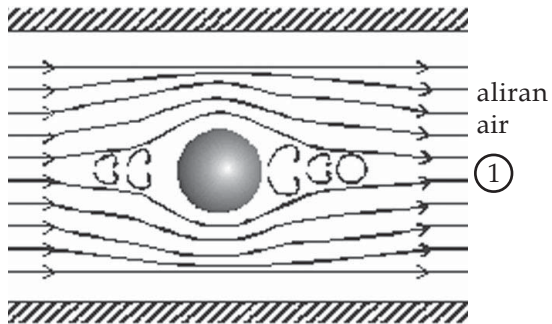
## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal berikut dengan benar di dalam buku tugas Anda!

1. Dari sebuah bak penampung, air mampu dialirkan air sebanyak 1.200 liter dalam waktu  $\frac{1}{2}$  menit. Berapakah debit alirannya?
2. Sebuah kran yang diameternya 6 cm dilalui air dengan kelajuan 2 m/s. Berapakah debit air kran tersebut?
3. Sebuah pipa pipa yang panjangnya 15 m dan jari-jari 7 cm dipasang mendatar. Jika ke dalam pipa dialirkan zat cair dengan koefisien viskositas dinamis 0,02 pa, maka tentukan:
  - a. tekanan yang diperlukan agar debit yang dihasilkan 20 liter persekon,
  - b. laju aliran di tengah pipa, dan
  - c. laju rata-rata aliran zat cairnya!

### 3. Turbulensi

Perhatikan Gambar 8.15! Gambar di samping menunjukkan dua pola aliran air yang berbeda. Pertama, pola aliran dengan garis arus mengikuti garis-garis yang sejajar atau garis lengkung. Pada pola ini arah gerak bagian-bagian air teratur. Pola ini disebut sebagai aliran laminar (stasioner). Kedua, pola aliran yang arah gerak bagian-bagiannya tidak teratur dan banyak pusaran. Pada pola ini garis arusnya akan saling memotong. Pola demikian disebut sebagai aliran turbulen.



**Gambar 8.15** Pola aliran laminar dan turbulen.

Batas antara aliran laminar dan turbulen bagi zat cair yang mengalir di dalam pipa dinyatakan dengan bilangan Reynolds ( $N_R$ ), yang dinyatakan sebagai berikut.

$$N_R = \rho \frac{v d}{\eta}$$

Keterangan:

$v$  : kecepatan rata-rata zat cair (m/s)

$\eta$  : koefisien viskositas fluida (Pa s)

$d$  : diameter pipa (m)

$\rho$  : massa jenis zat cair (kg/m<sup>3</sup>)

Pada aliran zat cair melalui pipa, jika harga  $N_R < 2.000$ , maka aliran-nya disebut laminar. Jika harga  $N_R$  antara  $2.000 < N_R < 3.000$ , maka alirannya disebut transisi (peralihan). Dan jika nilai  $N_R > 3.000$ , maka alirannya disebut turbulen. Bilangan Reynolds tidak mempunyai dimensi sehingga tidak mempunyai satuan.



### CONTOH SOAL

Air mengalir dalam pipa yang berdiameter 2,5 cm dengan kecepatan rata-rata 0,5 m/s. Jika koefisien viskositas air 0,01 Pa s dan massa jenisnya 1 g/cm<sup>3</sup>, maka tentukan debit aliran air, bilangan Reynold, dan jenis aliran yang terjadi!

Diketahui :  $d = 2,5 \text{ cm} = 2,50 \times 10^{-2} \text{ m}$

$v = 0,5 \text{ m/s}$

$\eta = 0,01 \text{ Pa s} = 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$

$\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1.000 \text{ kg/m}^3$

Ditanyakan: a.  $Q = \dots ?$

b.  $N_R = \dots ?$

c. Jenis aliran = ... ?

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } Q &= A \cdot v = \frac{\pi d^2}{4} \cdot v = \frac{\pi \times (2,5 \times 10^{-2})^2 \times 0,5}{4} \\ &= 7,8125 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 7,8125 \times 10^{-2} \text{ liter/s} \\ &= 0,245 \text{ liter/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } N_R &= \frac{\rho \times v \times d}{\eta} = \frac{1.000 \times 0,5 \times (2,5 \times 10^{-2})}{10^{-3}} \\ &= 1,25 \times 10^4 \\ &= 12.500 \end{aligned}$$

c. karena  $N_R > 3.000$ , maka terjadi aliran turbulen.





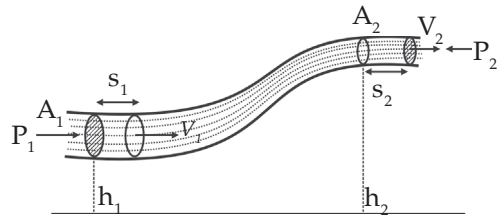
## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal berikut dengan benar di dalam buku tugas Anda!

1. Jelaskan yang dimaksud dengan aliran laminar, aliran turbulen, dan aliran transisi!
2. Bagaimana cara menghindari aliran turbulen dalam pipa? Jelaskan!
3. Pada pipa yang diameternya 14 cm mengalir sejumlah air dengan kecepatan rata-rata 0,4 m/s. Jika koefisien viskositas air sebesar  $10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ , maka tentukan debit, bilangan Reynold, dan jenis alirannya!
4. Minyak yang massa jenisnya  $0,8 \text{ g}/\text{cm}^3$  dialirkan pada pipa yang jari-jarinya 5 cm. Jika koefisien viskositas minyak =  $10^{-2} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ , maka tentukan bilangan Reynolds dan jenis alirannya jika kecepatan rata-ratanya 7 m/s!

## 4. Hukum Bernoulli

Saat Anda berdiri di tengah angin yang cukup besar. Udara yang bergerak mengerjakan gaya tekan pada tubuh Anda. Peristiwa ini menunjukkan bahwa fluida yang bergerak dapat menimbulkan tekanan. Perhatikan Gambar 8.16! Suatu fluida yang massa jenisnya  $\rho$  dialirkan ke dalam pipa dengan penampang yang berbeda. Tekanan  $P_1$  pada penampang  $A_1$  disebabkan oleh gaya  $F_1$  dan tekanan  $P_2$  disebabkan oleh gaya  $F_2$ . Gaya  $F_1$  melakukan usaha sebesar  $w_1 = F_1 s_1$  dan  $F_2$  melakukan usaha sebesar  $w_2 = -F_2 s_2$ . Tanda negatif menyatakan bahwa gaya yang bekerja ke arah kiri, sedangkan perpindahan ke arah kanan. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 8.16 Skema hukum Bernoulli.

$$\begin{aligned} w_{\text{total}} &= w_1 + w_2 = F_1 s_1 + (-F_2 s_2) \\ &= P_1 A_1 s_1 - P_2 A_2 s_2 \\ &= P_1 V_1 - P_2 V_2 \end{aligned}$$

$$w_{\text{total}} = (P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

Besar usaha total tersebut sesuai dengan perubahan energi mekanik ( $E_p + E_k$ ) yang terjadi saat fluida berpindah dari bagian penampang  $A_1$  ke  $A_2$ .

$$w_{\text{total}} = E_m = \Delta E_p + \Delta E_k$$

$$= \left( \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \right) + (mgh_2 - mgh_1)$$

$$w_{\text{total}} = m \left( \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(h_2 - h_1) \right) \dots\dots\dots (2)$$

Apabila persamaan (1) dan (2) digabungkan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$(P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} = m \left( \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(h_2 - h_1) \right)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(h_2 - h_1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$\text{Jadi, } P + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstan.}$$

Persamaan di atas dikenal sebagai persamaan Bernoulli. Besaran  $\rho gh$  adalah energi potensial fluida per satuan volume  $\left( \frac{E_p}{V} \right)$ . Nilai  $\frac{1}{2}\rho v^2$

adalah energi kinetik fluida per satuan volume  $\left( \frac{E_k}{V} \right)$  sebab  $\frac{m}{V} = \rho$ .

Berdasarkan persamaan Bernoulli, dapat diturunkan persamaan untuk fluida bergerak dan tidak bergerak. Persamaan untuk fluida tidak bergerak ( $v_1 = v_2 = 0$ ) adalah  $P_1 - P_2 = \rho g(h_2 - h_1)$ . Sedangkan untuk fluida yang mengalir dalam pipa horizontal ( $h_1 = h_2$ ) persamaannya adalah

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2).$$

## 5. Gaya Angkat Pesawat Terbang

Bagaimana pesawat terbang yang sangat berat dapat terbang melayang di udara? Untuk memahaminya lakukanlah tugas berikut!

### TUGAS



Tujuan : menyelidiki gaya angkat sayap pada pesawat terbang.

Alat dan Bahan : dua buah buku yang tebal, dan kertas folio.

Langkah Kerja :

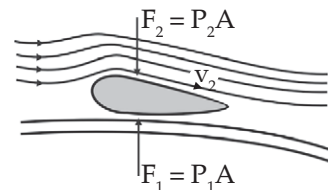
1. Letakkan kedua buku di atas meja mendatar dengan jarak antarbuku sekitar 20 cm!
2. Letakkan kertas folio di atas kedua buku seperti terlihat pada gambar di samping!
3. Tiuplah bagian bawah kertas folio tersebut. Amatilah, ke mana arah gerak kertas folio tersebut?
4. Tiuplah bagian atas kertas folio tersebut. Amatilah, kemana arah gerak kertas folio tersebut?
5. Ulangilah percobaan tersebut beberapa kali agar diperoleh data yang tepat!
6. Buatlah kesimpulan berdasarkan percobaan tersebut!



Sumber: Foto Haryana.

Pesawat terbang dapat terangkat ke udara karena kelajuan udara yang melalui sayap pesawat. Penampang sayap pesawat terbang mempunyai bagian belakang yang lebih tajam dan sisi bagian atas yang lebih melengkung daripada sisi bagian bawahnya.

Perhatikan Gambar 8.17! Garis arus pada sisi bagian atas lebih rapat daripada sisi bagian bawahnya. Artinya, kelajuan aliran udara pada sisi bagian atas pesawat  $v_2$  lebih besar daripada sisi bagian bawah sayap  $v_1$ . Sesuai dengan asas Bernoulli, tekanan pada sisi bagian atas  $P_2$  lebih kecil daripada sisi bagian bawah  $P_1$  karena kelajuan udaranya



**Gambar 8.17** Penampang lintang sayap pesawat.

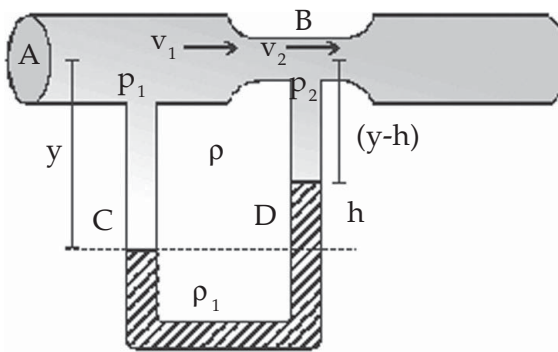
lebih besar. Dengan  $A$  sebagai luas penampang pesawat, maka besarnya gaya angkat dapat Anda ketahui melalui persamaan  $F_1 - F_2 = (P_1 - P_2)A$

$$A = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)A.$$

Pesawat terbang dapat terangkat ke atas jika gaya angkat lebih besar daripada berat pesawat ( $F_1 - F_2 > mg$ ). Jika pesawat telah berada pada ketinggian tertentu dan pilot ingin mempertahankan ketinggiannya (melayang di udara), maka kelajuan pesawat harus diatur sedemikian rupa sehingga gaya angkat sama dengan berat pesawat ( $F_1 - F_2 = mg$ ).

## 6. Venturimeter

Venturimeter adalah alat untuk mengukur debit aliran zat cair yang mengalir melalui suatu saluran (pipa). Alat tersebut terdiri atas sebuah pipa yang mempunyai dua macam luas penampang dan dilengkapi manometer air raksa. Aliran yang akan diukur debitnya dilewatkan pada pipa venturimeter.



**Gambar 8.18** Venturimeter merupakan contoh penerapan hukum Bernoulli.

Perhatikan Gambar 8.18! Misalkan luas penampang pipa di  $A = A_1$ , di  $B = A_2$ , kecepatan rata-rata aliran di  $A = v_1$ , di  $B = v_2$ , tekanan aliran di  $A = P_1$ , di  $B = P_2$ , massa jenis zat cair =  $\rho$ , massa jenis air raksa  $\rho'$ , jarak permukaan air raksa di titik C dari pusat lingkaran pipa =  $y$ , dan selisih tinggi permukaan air raksa pada kedua kaki manometer adalah  $h$ .

Menurut hukum kontinuitas diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 \Rightarrow v_2 = A_1 \times \frac{v_1}{A_2}$$

Karena kedudukan raksa setimbang, maka tekanan hidrostatik di titik C sama dengan tekanan hidrostatik di titik D. Tekanan di C terdiri atas tekanan aliran  $P_1$  dan tekanan lajur zat cair yang tingginya  $y$ . Tekanan di titik D terdiri atas tekanan aliran  $P_2$ , tekanan lajur zat cair yang tingginya  $(y - h)$ , dan tekanan laju raksa yang tingginya  $h$ . Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_C &= P_D \\
 P_1 + y \rho g &= P_2 + (y - h) \rho g + h \rho' g \\
 P_1 + y \rho g &= P_2 + y \rho g - h \rho g + h \rho' g \\
 P_1 - P_2 &= (\rho' - \rho) g h
 \end{aligned}$$

Oleh karena kedudukan pipa mendatar, menurut hukum Bernoulli persamaannya menjadi seperti berikut.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho A_1^2 \frac{v_1^2}{A_2^2}$$

$$\frac{1}{2} \rho A_1^2 \frac{v_1^2}{A_2^2} - \frac{1}{2} \rho v^2 = P_1 - P_2$$

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right) = (\rho' - \rho) g h$$

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 \left( \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2} \right) = v_2^2 \frac{2(\rho' - \rho) g h}{\rho (A_1^2 - A_2^2)}$$

$$v_1^2 = A_2^2 \frac{2(\rho' - \rho) g h}{\rho (A_1^2 - A_2^2)}$$

Kecepatan aliran zat cair yang melalui venturimeter dipenuhi oleh persamaan berikut.

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) g h}{\rho (A_1^2 - A_2^2)}}$$



### UJI PEMAHAMAN

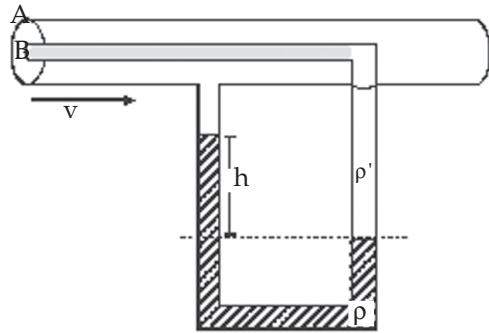
Kerjakan soal-soal berikut di dalam buk tugas Anda!

1. Luas penampang pada suatu tabung venturimeter adalah 8 cm<sup>2</sup> dan 4 cm<sup>2</sup>. Jika selisih ketinggian zat cair yang ditunjukkan alat 20 cm, maka berapakah kelajuan air saat memasuki tabung alat tersebut?

2. Bagaimanakah hubungan antara luas penampang yang tengah dengan yang di pinggir pada venturimeter?
3. Perbandingan luas penampang tabung venturimeter 1 : 3. Jika selisih ketinggian zat cairnya 4 cm, maka berapakah kelajuan zat cairnya?
4. Bagaimanakah hubungan antara selisih ketinggian zat cair di dalam tabung tegak dengan penampang venturimeter yang di tengah dan yang dipinggir?

## 7. Tabung Pitot

Tabung pitot digunakan untuk mengukur kecepatan aliran gas atau mengukur kecepatan benda terhadap udara. Bentuknya seperti tampak pada Gambar 8.19 dan diisi zat cair yang massa jenisnya kecil. Aliran udara (gas) yang diukur kecepatannya dilewatkan dekat lubang B yang arahnya sejajar arah aliran. Kecepatan dan tekanan udara di muka lubang B sama dengan kecepatan dan tekanan udara pada aliran bebas (di luar). Tekanan pada kaki manometer sama dengan tekanan aliran udara, yaitu  $P_B$ . Kecepatan udara di titik A adalah nol, sedangkan tekanan udara di situ disebut  $P_A$ . Tekanan udara pada kaki kanan manometer ( $P_A$ ) sama dengan tekanan udara pada kaki kiri manometer ( $P_B$ ) ditambah tekanan laju zat cair yang tingginya



Gambar 8.19 Diagram penampang tabung pitot.

$$P_A = P_B + h' g$$

Berdasarkan persamaan Bernoulli diperoleh penjabaran sebagai berikut.

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

Karena  $v_A = 0$ , maka:

$$P_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v^2, \text{ dengan } v_B = v$$

Berdasarkan dua kondisi di atas diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$P_B + h \rho' g = P_B + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$h \rho' g = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2 g h \cdot \rho'}{\rho}}$$

Keterangan:

$\rho'$  : massa jenis zat cair

$\rho$  : massa jenis gas (udara)



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Untuk mengukur laju aliran gas digunakan pipa pitot. Jika massa jenis gas yang akan diukur kelajuannya  $2 \text{ kg/m}^3$  dan ketinggian raksa pada kedua kaki manometer  $4 \text{ cm}$ , maka berapakah laju aliran gas tersebut?
2. Laju aliran suatu gas ketika diukur menggunakan pipa pitot adalah  $1,66 \text{ m/s}$ . Jika ketinggian raksa pada kedua manometer adalah  $2 \text{ cm}$ , maka berapakah massa jenis gas tersebut?
3. Untuk menentukan kelajuan suatu gas dengan menggunakan pipa pitot, sebutkan besaran yang selalu tetap dan yang selalu berubah!
4. Sejumlah gas dengan massa jenis  $0,75 \text{ kg/m}^3$  dilewatkan pada pipa pitot dan melaju dengan kelajuan  $3,01 \text{ m/s}$ . Berapakah ketinggian raksa di kedua kaki manometer tersebut?
5. Jika massa jenis gas yang dilewatkan pada pipa pitot besarnya  $0,1$  kali massa jenis raksa dan ketinggian raksa di kedua kaki manometer  $1 \text{ cm}$ , maka berapakah kelajuan gas tersebut?

### RANGKUMAN

1. Fluida statis adalah fluida yang tidak mengalami perpindahan bagian-bagian pada zatnya.
2. Tekanan didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada suatu bidang per satuan luas bidang tersebut.

3. Contoh tekanan fluida statis pada ruang terbuka adalah hukum utama hidrostatis, bejana berhubungan, dan hukum archimedes.
4. Tegangan permukaan adalah gaya yang membuat permukaan cairan menegang seperti selaput.
5. Gejala kapilaritas merupakan peristiwa naik turunnya zat cair di dalam pipa kapiler.
6. Viskositas adalah ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida.
7. Fluida dinamis adalah fluida yang mengalami perpindahan bagian-bagian pada zat itu.

### ● TUGAS PROYEK

Pergilah ke tempat pemijahan ikan, kompleks peternakan ikan atau tambak yang ada di daerahmu. Biasanya, di tempat-tempat tersebut terdapat alat yang berfungsi untuk menginjeksikan udara ke dalam air. Tanyakan cara kerja alat tersebut kepada petugas yang ada di tempat itu. Untuk memperdalam pemahamanmu tentang alat tersebut, carilah sumber lain seperti di buku, majalah, dan atau internet. Sekarang, rancang dan buatlah alat tersebut dengan menggunakan bahan-bahan bekas yang ada di sekitar Anda. Jika dinilai layak oleh para pengguna, juallah!

### ● UJI KOMPETENSI

*Kerjakan soal-soal berikut di dalam buku tugas Anda!*

1. Seorang pematung membuat kerucut dari kayu dengan diameter alas 14 cm dan tinggi 30 cm. Jika massa kerucut kayu tersebut 1.155 g, maka bagaimana saat akan dimasukkan ke dalam air ?
2. Suatu pipa U diisi air dan zat cair lain yang massa jenisnya  $1,75 \text{ g/cm}^3$ . Jika tinggi airnya 5,25 cm, maka berapakah tinggi zat cairnya?
3. Berat sebuah benda ketika ditimbang di udara adalah 500 N. Jika beratnya di air hanya 400 N, maka berapakah massa jenis benda tersebut?



4. Suatu benda mempunyai massa jenis  $0,75 \text{ g/cm}^3$ . Jika benda dimasukkan ke dalam air, maka berapa bagian benda yang tenggelam?
5. Suatu bejana diisi air dan zat cair lain dengan perbandingan 1 : 4. Jika luas penampang bejana  $1 \text{ dm}^2$ , massa jenis zat cair  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , maka hitunglah jarak suatu titik dari permukaan supaya tekanan hidrostatisnya  $20.000 \text{ dyne/cm}^2$  !
6. Suatu benda yang panjangnya  $7,5 \text{ cm}$  salah satu ujungnya runcing dengan luas penampang  $1 \text{ cm}^2$ . Jika benda tersebut diletakkan di atas papan kayu secara tegak dengan bagian runcing di bawah dan kemudian dipukul dengan gaya  $50 \text{ N}$ , maka berapa besar tekanan terjadi?



### REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

## BAB 9

# TEORI KINETIK GAS DAN TERMODINAMIKA

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi pada bab ini, diharapkan Anda mampu mendiskripsikan, menganalisis, dan menyelesaikan permasalahan yang terkait dengan sifat-sifat gas ideal monoatomik serta perubahan keadaan gas ideal dengan menerapkan hukum termodinamika.

### Kata Kunci

- Energi Dalam
- Gas Ideal
- Entropi
- Ekipartisi
- Kapasitas Kalor
- Siklus Carnot

Pernahkan Anda bermain tenis meja? Mungkin Anda pernah menginjak bola tenis meja dan bola menjadi penyok. Jika tidak ada gantinya dan permainan ingin dilanjutkan, maka apa yang harus Anda dilakukan? Anda dapat menggunakan air panas untuk mengembalikan bola seperti semula. Caranya sederhana, Anda tinggal memasukkan bola ke dalam air panas tersebut. Sesaat setelah itu bola akan kembali ke bentuk semula dan permainan bisa dilanjutkan.

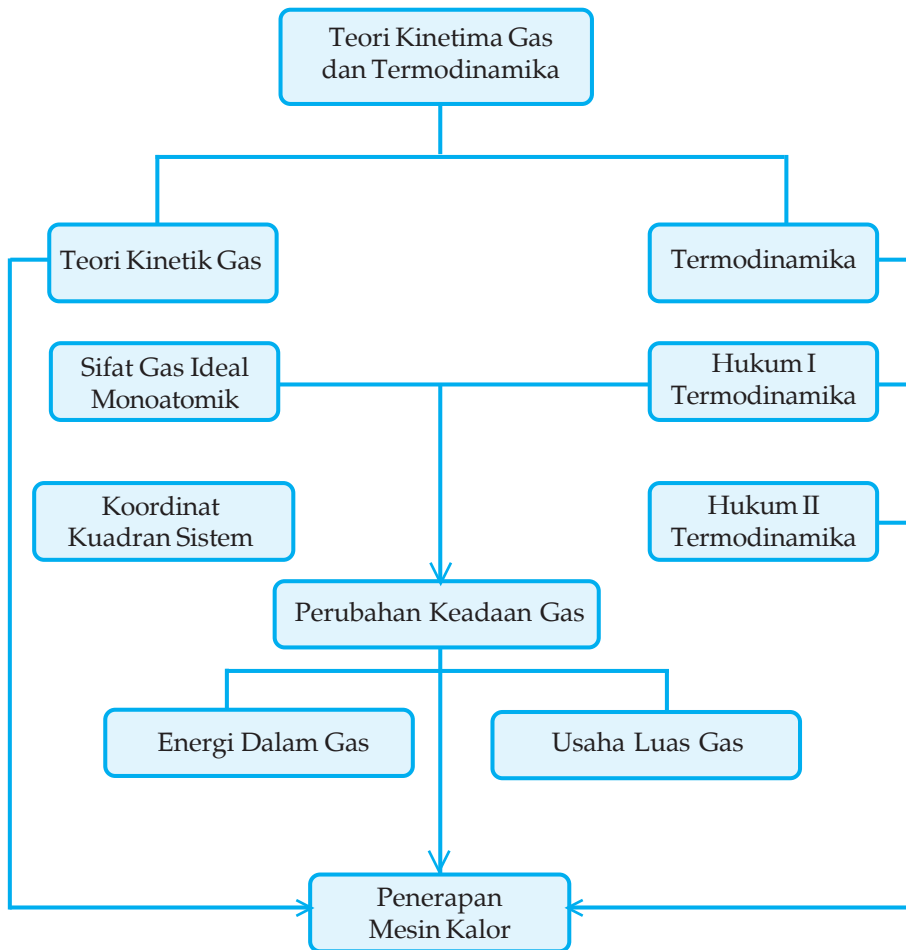
Mengapa bola bisa mengembang lagi? Apa yang terjadi dengan gas yang ada di dalam bola pada saat dipanaskan? Pada bab ini Anda akan mempelajari tentang gas ideal dan termodinamika. Gas ideal merupakan gas yang secara tepat memenuhi hukum-hukum gas. Sedangkan termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang mempelajari energi (terutama energi panas) dan transformasinya.



Sumber: Encarta Encyclopedia, 2006.

**Gambar 9.1** Pemahaman fisika dapat dimanfaatkan untuk mengatasi masalah tentang penyoknya bola ping-pong.

Untuk mempermudah mempelajari materi pada bab ini, coba Anda perhatikan peta konsep berikut!



## A. Teori Kinetik Gas

Teori kinetik gas memberikan jembatan antara tinjauan gas secara mikroskopik dan makroskopik. Hukum-hukum gas seperti hukum Boyle, Charles, dan Gay Lussac, menunjukkan hubungan antara besaran-besaran mikroskopik dari berbagai macam proses serta perumusannya. Kata kinetik berasal dari adanya anggapan bahwa molekul-molekul gas selalu bergerak.

Dalam teori kinetik gas, kita akan membahas tentang perilaku partikel-partikel gas dalam ruang yang terbatas. Partikel-partikel gas ini kita anggap sebagai sebuah bola yang selalu bergerak. Tiap-tiap partikel bergerak dengan arah sembarang dan dimungkinkan terjadi tumbukan antarmasing-masing partikel atau antara partikel dengan dinding ruang. Tumbukan yang terjadi tersebut berupa tumbukan lenting sempurna. Dengan sifat tumbukan yang demikian, maka tidak ada proses kehilangan energi yang dimiliki partikel gas pada saat terjadi tumbukan.

Gas yang tersusun atas partikel-partikel dengan perilaku seperti anggapan di atas pada kenyataannya tidak ada. Dalam bahasan teoritik, diperlukan objek gas yang sesuai dengan anggapan tersebut. Objek gas ini disebut sebagai gas ideal. Sifat-sifat gas ideal, antara lain, sebagai berikut.

1. Gas terdiri atas partikel-partikel padat kecil yang bergerak dengan kecepatan tetap dan dengan arah sembarang.
2. Masing-masing partikel bergerak dalam garis lurus, gerakan partikel hanya dipengaruhi oleh tumbukan antara masing-masing partikel atau antara partikel dan dinding. Gaya tarik-menarik antarpartikel sangat kecil sekali dan dianggap tidak ada (diabaikan).
3. Tumbukan antara masing-masing partikel atau antara partikel dengan dinding adalah tumbukan lenting sempurna.
4. Waktu terjadinya tumbukan antarpartikel atau antara partikel dengan dinding sangat singkat dan bisa diabaikan.
5. Ukuran volume partikel sangat kecil dibandingkan ukuran volume ruang tempat partikel tersebut bergerak.
6. Berlaku hukum Newton tentang gerak.

## B. Persamaan Gas Ideal

Sebuah balon yang dikembangkan maksimal dan diikat ujungnya, jika ditempatkan diterik matahari akan meletus. Demikian juga dengan ban kendaraan. Ban kendaraan dapat meletus jika diparkir diterik matahari dalam waktu lama. Apa yang dapat Anda pelajari dari peristiwa-peristiwa tersebut?

Hukum Boyle-Gay Lussac berlaku untuk gas ideal dalam keadaan bejana tertutup (balon yang diikat dan ban kendaraan). Persamaan hukum Boyle-Gay Lussac dapat dituliskan  $\frac{PV}{T} = \text{tetapan (konstan)}$ . Para ahli kimia menemukan bahwa tetapan (konstan) itu sebanding dengan jumlah mol ( $n$  R). Oleh karena itu, persamaannya menjadi sebagai berikut.

$$\frac{PV}{T} = nR \text{ atau } PV = nRT$$

Simbol R selanjutnya disebut konstanta gas umum yang nilainya 8,31 J/mol K atau 0,082 L atm/mol K. Persamaan ini disebut persamaan gas ideal. Jika  $n = \frac{N}{N_a}$ , maka persamaan gas ideal di atas dapat ditulis

$$PV = \frac{N}{N_a}RT = N\left(\frac{R}{N_a}\right)T.$$

Jika  $\frac{R}{N_a} = k$ , maka persamaannya menjadi  $PV = NkT$ . Nilai  $k$  merupakan tetapan Boltzman yang nilainya  $1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ .

Jika  $n = \frac{m}{M}$  dengan  $n$  merupakan jumlah mol,  $m$  merupakan massa total gas, dan  $M$  merupakan massa molekul gas, maka persamaan gas ideal menjadi  $PV = \frac{m}{M}RT = \frac{m}{V} \frac{RT}{M}$ . Dan jika  $\frac{m}{V} = \rho$ , maka persamaannya menjadi  $P = \frac{\rho RT}{M}$ . Konstanta  $\rho$  merupakan massa jenis benda.



### CONTOH SOAL

Gas dalam ruang tertutup yang bervolume 20.000 liter dan suhu 27° C memiliki tekanan 10 atm. Tentukan jumlah mol gas yang berada dalam ruang tersebut!

Diketahui :  $V = 20.000 \text{ liter}$

$t = 27^\circ \text{ C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$P = 10 \text{ atm}$

Ditanyakan:  $n = \dots?$

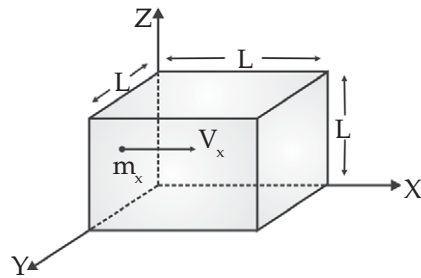
Jawab :

$$\begin{aligned} PV = nRT \Rightarrow n &= \frac{PV}{RT} \\ &= \frac{10 \times 20.000}{0,082 \times 300} \\ &= 8.130,081 \text{ mol} \end{aligned}$$

Jadi, banyaknya mol gas adalah 8.130,081 mol.

### C. Tekanan dan Ketetapan Gas Ideal

Tekanan gas pada dinding bejana sama dengan besarnya momentum yang diberikan oleh molekul gas pada tiap satuan luas tiap satuan waktu. Perhatikan Gambar 9.2 berikut! Misalnya terdapat suatu molekul gas ideal yang berada dalam sebuah bejana berbentuk kubus dengan panjang sisi  $L$ . Molekul gas tersebut memiliki massa  $m$ , dan kecepatan terhadap sumbu  $X$  sebesar  $v_x$ .



**Gambar 9.2** Molekul gas dalam dinding bejana berbentuk kubus.

Sebelum molekul menumbuk dinding momentumnya  $m \times v_x$ . Setelah menumbuk dinding molekul berubah arahnya sehingga momentumnya menjadi  $-m \times v_x$ . Jadi, setiap kali molekul menumbuk dinding, molekul tersebut mengalami perubahan momentum sebesar selisih antara momentum sebelum tumbukan dan momentum setelah tumbukan  $\Delta p = p_1 - p_2 = (m \times v_x) - (-m \times v_x) = 2 m v_x$ . Molekul tersebut akan

menumbuk dinding untuk kedua kalinya setelah selang waktu  $\Delta t = \frac{2L}{v_x}$ .

Sehingga momentum per satuan waktu yang diberikan oleh molekul ke dinding bejana adalah sebagai berikut.

$$p_x = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2 m v_x}{\frac{2L}{v_x}} = \frac{2 m v_x^2}{2L}$$

Sebaliknya, dinding akan mengalami momentum per satuan waktu yang sama besarnya tetapi berlawanan arahnya. Jika dalam bejana terdapat  $N$  molekul gas dengan kecepatan rata-rata  $v_x$ , maka besar momentum persatuan waktu yang diterima dinding adalah  $p_x = \frac{Nm v_x^2}{L_x}$ .

Diketahui bahwa molekul gas bergerak dalam tiga dimensi (ke segala arah). Sesuai dengan anggapan tersebut, maka rata-rata kecepatan kuadrat kelajuan pada arah sumbu  $X, Y$ , dan  $Z$  adalah sama besar ( $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ ). Jadi, resultan rata-rata kuadrat kecepatan ( $v^2$ ) adalah

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2} \text{ atau } \overline{v^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}.$$

Oleh karena itu, besar momentum per satuan waktu yang diterima

dinding bejana kubus adalah  $p = \frac{Nm \left( \frac{1}{3} \overline{v^2} \right)}{L^3} = \frac{1}{3} \frac{Nm \overline{v^2}}{L^3}$ . Karena  $L^3$

merupakan volume kubus ( $V$ ), maka persamannya  $p = \frac{1}{3} \frac{Nm \overline{v^2}}{V}$  atau

$p = \frac{1}{3} m \overline{v^2} \left( \frac{N}{V} \right)$  atau  $pV = \frac{1}{3} m \overline{v^2} N$ . Jika dihubungkan dengan  $PV = N k T$ ,

maka persamaan berubah menjadi  $v = \sqrt{\frac{3 N k T}{Nm}} = \sqrt{\frac{3 k T}{m}}$  atau  $v = \sqrt{\frac{3 P V}{Nm}}$ .

Dan jika dihubungkan dengan energi kinetik rata-rata ( $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ ), maka persamaan menjadi sebagai berikut.

$$P = \frac{2}{3} E_k \left( \frac{N}{V} \right) \text{ atau } P V = \frac{2}{3} E_k N$$

Keterangan:

$P$  : tekanan gas ( $Nm^{-2}$ )

$N$  : jumlah molekul

$v$  : kecepatan (m/s)

$m$  : massa molekul (kg)

$V$  : volume gas ( $m^3$ )

$E_k$  : energi kinetik (J)



### CONTOH SOAL

Pada sebuah tabung tertutup yang bervolume 10 liter terdapat 20 mol gas ideal dan tekanan sebesar 2 atm. Jika banyaknya molekul gas dalam tabung tersebut  $10 \times 10^{21}$ , maka tentukan energi kinetik total gas dalam tabung!

Diketahui :  $V = 10$  liter

$N = 10 \times 10^{21}$  partikel

$P = 2$  atm

$n = 20$  mol

Ditanyakan:  $E_k = \dots?$

Jawab :

$$P = \frac{\frac{3}{2} P V}{N} \Rightarrow E_k = \frac{\frac{3}{2} \times 2 \times 10}{10 \times 10^{21}}$$

$$= \frac{\frac{3}{2} \times 2 \times 10}{10 \times 10^{21}}$$

$$= 3 \times 10^{-21} \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik total dalam tabung sebesar  $3 \times 10^{-21}$  J.



### UJI PEMAHAMAN

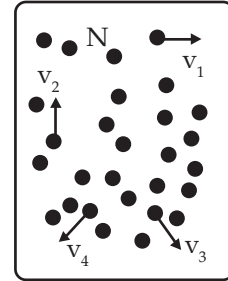
*Kerjakan latihan soal-soal berikut di dalam buku tugas Anda!*

1. Sebuah partikel yang massanya  $1,35 \times 10^{-4}$  g menumbuk dinding dengan kelajuan 36 km/jam. Jika tumbukkan antara partikel dan dinding dianggap lenting sempurna, maka berapa besar perubahan momentumnya?
2. Dua belas partikel yang massanya sama, yaitu  $4,7 \times 10^{-3}$  gram menumbuk dinding secara lenting sempurna dengan kelajuan 54 km/jam. Hitunglah besarnya perubahan momentum totalnya!
3. Dalam selang waktu 0,75 sekon sebanyak 18 partikel yang massanya sama, yaitu  $2,8 \times 10^{-5}$  g menumbuk dinding kaca secara lenting sempurna dengan kelajuan 24 km/jam. Berapa besar gaya rata-rata yang dikerjakan gas dalam selang waktu tersebut ?



## D. Kecepatan Efektif Gas Ideal

Karena molekul-molekul gas tidak seluruhnya bergerak dalam kecepatan yang sama, maka Anda perlu mendefinisikan arti  $\overline{v^2}$ . Misalnya, di dalam sebuah bejana tertutup terdapat  $N_1$  molekul yang bergerak dengan kecepatan  $v_1$ ,  $N_2$  molekul yang bergerak dengan kecepatan  $v_2$ , dan seterusnya, maka rata-rata kuadrat kecepatan molekul gas ( $\overline{v^2}$ ) dapat dinyatakan melalui persamaan berikut.



**Gambar 9.3** Molekul bergerak secara acak

$$\overline{v^2} = \frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + N_3 v_3^2 + \dots + N_i v_i^2}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_i} = \frac{\sum N_i v_i^2}{\sum N_i}$$

Kecepatan efektif gas ideal  $v_{\text{rms}}$  (rms = root mean square) didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat kecepatan ( $v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}}$  atau  $\overline{v^2} = v_{\text{rms}}^2$ ). Mengingat bahwa  $\overline{E_k} = \frac{1}{2} \overline{v^2} = \frac{1}{2} m v_{\text{rms}}^2$ , maka persamaan dapat ditulis menjadi sebagai berikut.

$$\frac{1}{2} m v_{\text{rms}}^2 = \frac{3}{2} kT \text{ atau } v_{\text{rms}}^2 = \frac{\sqrt{3kT}}{m}$$

Karena  $k = \frac{R}{N_a}$  dan  $m = \frac{M_r}{N_a}$ , maka persamaannya menjadi:

$$v_{\text{rms}}^2 = \frac{\sqrt{3RT}}{M_r}$$

Mengingat bahwa massa jenis  $\rho = \frac{m}{V}$ , maka persamaan tekanan gas dan kecepatan efektifnya dapat ditulis sebagai berikut.

$$P = \frac{1}{3} \frac{m}{V} v_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{3} \rho v_{\text{rms}}^2 \text{ atau } v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$



### CONTOH SOAL

Pada sebuah tangki yang bervolume 20 liter terdapat suatu gas yang bermassa  $5,32 \times 10^{-26}$  kg. Saat suhunya  $27^\circ \text{C}$ , tekanan gas tersebut sebesar 10 atm. Tentukan kecepatan efektif gas tersebut!

Diketahui :  $V = 20$  liter

$$T = 27^\circ \text{C} = 300 \text{ K}$$

$$P = 10 \text{ atm}$$

$$m = 5,32 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

Ditanyakan:  $v_{\text{rms}} = \dots ?$

Jawab :

$$\begin{aligned} v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{5,31 \cdot 10^{-26}}} = \sqrt{\frac{900 \cdot 1,38}{5,31} 10^3} \\ &= \sqrt{23,39 \cdot 10^4} \\ &= 4,84 \times 10^2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Jadi kecepatan efektif gas tersebut adalah 484 m/s



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Terdapat 40 mol gas ideal pada kubus kaca yang panjang rusuknya 8 cm. Berapa banyak partikel yang terdapat di dalam kubus kaca tersebut?
2. Sebanyak 40 mol gas ideal berada pada tabung kaca yang diameternya 14 cm dan tingginya 20 cm. Jika tekanan pada tabung 5 atm, maka tentukan jumlah partikel dan energi kinetik gas!
3. Berapa jumlah partikel yang terdapat pada tabung berkapasitas 10 liter dengan suhu 200 K dan tekanan 1,25 atm?
4. Berapakah besar kecepatan efektif yang dimiliki oleh gas yang massa partikelnya  $2,6 \times 10^{-26}$  kg dengan suhu 900 K?
5. Berapa besarnya energi kinetik rata-rata yang dimiliki oleh molekul gas pada suhu 400 K?
6. Sebanyak 45 liter gas oksigen ( $\text{O}_2$ ) di dalam tabung besi yang mempunyai suhu 300 K dan tekanan 12 atm. Berapakah massa tiap partikel gas dan kecepatan efektifnya?

## E. Suhu dan Energi Kinetik Gas Ideal

Bagaimana suhu gas ideal jika dipandang dari sudut mikroskopiknya?

Telah Anda ketahui bahwa  $P V = \frac{2}{3} E_k N$ . Jika dihubungkan dengan persamaan  $P V = n R T$ , maka dapat diperoleh persamaan berikut.

$$n R T = \frac{2}{3} E_k N \text{ atau } T = \frac{2 N E_k}{3 n R}$$

Jika dihubungkan dengan persamaan  $p V = N k T$ , maka diperoleh persamaan:

$$N k T = \frac{2}{3} E_k N \text{ atau } E_k = \frac{3}{2} k T \text{ atau } T = \frac{2 E_k}{3 k} \text{ (untuk } N = 1 \text{)}$$

Secara fisis persamaan  $T = \frac{2 E_k}{3 k}$  mempunyai arti bahwa suhu gas hanya berhubungan dengan gerak partikel. Makin cepat gerak partikel gas makin tinggi suhu gas tersebut. Dan persamaan tersebut berlaku untuk gas monoatomik.



### CONTOH SOAL

Suatu gas ideal dalam ruang tertutup yang suhunya  $27^\circ \text{C}$  memiliki energi kinetik partikel sebesar 150 J. Jika energi kinetiknya 300 J, maka tentukanlah suhu gas sekarang!

Diketahui :  $T_1 = 27^\circ \text{C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$$E_{k1} = 150 \text{ J}$$

$$E_{k2} = 300 \text{ J}$$

Ditanyakan:  $T_2 = \dots ?$

Jawab :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{E_{k2}}{E_{k1}} \Rightarrow \frac{T_2}{300} = \frac{300}{150}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{300 \times 300}{150} \\ &= 600 \text{ K} \end{aligned}$$

Jadi, suhu gas akhir adalah 600 K



## UJI PEMAHAMAN

Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!

1. Tekanan gas dalam tabung tertutup menurun 36% dari semula. Berapa % kelajuan molekul gas tersebut menurun?
2. Sebuah tangki dengan volume 25 L mengandung 2 mol gas monoatomik. Jika setiap molekul gas memiliki energi kinetik rata-rata  $2,8 \times 10^{-21}$  J. Tentukanlah tekanan gas dalam tangki!
3. Suatu gas ideal dalam ruang tertutup memiliki energi kinetik  $4E_0$ . Jika energi kinetiknya dijadikan  $E_0$  dan suhu gas tersebut  $27^\circ \text{C}$  maka berapa suhu gas mula-mula?
4. Pada suhu tertentu, kecepatan 10 molekul gas adalah sebagai berikut.

Kecepatan (m/s)	10	20	30	40
Banyak molekul	3	4	2	1

Tentukanlah kecepatan rata-rata dan kecepatan efektif gas!

## F. Termodinamika

Setelah Anda mempelajari gas ideal, di mana energi yang dimiliki suatu gas dalam ruang tertutup dapat diidentifikasi dari suhunya (T).

Ingat kembali rumus  $E_k = \frac{3}{2} kT$ , persamaan ini menunjukkan bahwa energi kinetik yang dimiliki tiap-tiap partikel gas dipengaruhi oleh suhu gas (T). Makin tinggi suhu gas, makin besar pula energi kinetik partikelnya. Artinya, makin tinggi suhu suatu gas, makin besar pula energi yang tersimpan di dalamnya. Kondisi ini menghasilkan pertanyaan “Bagaimana cara menyimpan energi di dalam gas dan memanfaatkan energi tersebut dalam bentuk kerja?”. Suatu karakter dari benda gas yang menguntungkan adalah kemampuannya dalam menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi yang berupa kalor.

Proses penyerapan, penyimpanan, dan pelepasan kalor serta pemanfaatannya untuk menghasilkan kerja akan dibahas dalam subbab termodinamika. Sebelum menggunakan hukum-hukum termodinamika Anda

perlu mendefinisikan terlebih dahulu sistem dan lingkungan. *Sistem* adalah suatu benda atau keadaan yang menjadi pusat perhatian. Sedangkan *lingkungan* merupakan segala sesuatu di luar sistem yang dapat memengaruhi keadaan sistem secara langsung. Apabila antara sistem dan lingkungan memungkinkan terjadinya pertukaran materi dan energi, maka sistemnya disebut *sistem terbuka*. Jika hanya terbatas pada pertukaran energi disebut *sistem tertutup*. Sedangkan jika pertukaran materi maupun energi tidak mungkin terjadi, maka disebut *sistem terisolasi*. Sistem dan lingkungan dinamakan *semesta*.

## 1. Proses Termodinamika

Energi selalu berkaitan dengan usaha. Telah Anda ketahui bahwa usaha merupakan hasil perkalian gaya dengan perpindahan ( $W = F \times s$ ). Pada Gambar 9.1 memperlihatkan penampang air silinder yang didalamnya terdapat gas piston (pengisap). Piston ini dapat bergerak bebas naik turun. Jika luas piston  $A$  dan tekanan gas  $P$ , maka gas akan mendorong piston dengan gaya  $F = P \times A$ . Oleh karena itu, usaha yang dilakukan gas adalah  $W = F \times \Delta s$ . Jika  $F = P \times A$ , maka  $W = P \times A \times \Delta s$ .

Dan jika  $\Delta s = \frac{\Delta V}{A}$ , maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$W = P \times \Delta V \quad \text{atau} \quad W = P (V_2 - V_1)$$

Keterangan:

$W$  : usaha (J)

$P$  : tekanan tetap ( $\text{N/m}^2$ )

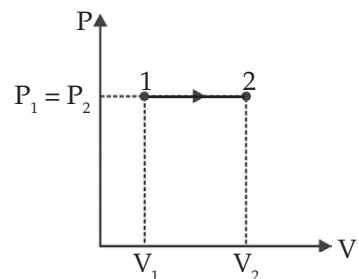
$V_1$  : volume awal ( $\text{m}^3$ )

$V_2$  : volume akhir ( $\text{m}^3$ )

Gas dalam ruang tertutup dapat mengalami beberapa proses yaitu proses isobarik, proses isokorik, proses isotermis, dan proses adiabatik.

### a. Proses Isobarik

Proses yang berlangsung pada tekanan tetap dinamakan *proses isobarik*. Bila volume gas bertambah, berarti gas melakukan usaha atau usaha gas positif (proses ekspansi). Jika volume gas berkurang, berarti pada gas dilakukan usaha atau usaha gas negatif (proses kompresi). Usaha yang dilakukan oleh gas pada proses isobarik dapat dinyatakan sebagai berikut.



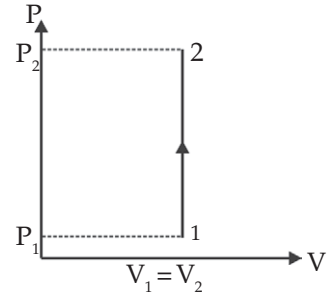
Gambar 9.4 Proses Isobarik

$$W = P \times \Delta V \text{ atau } W = P (V_2 - V_1)$$

Usaha yang dilakukan gas terhadap lingkungannya atau sebaliknya sama dengan luas daerah bawah grafik tekanan terhadap volume (grafik  $P - V$ ). Perhatikan Gambar 9.4!

### b. Proses Isokorik

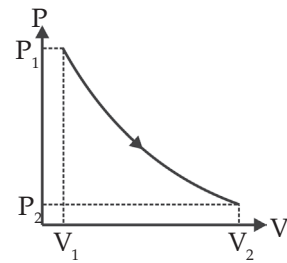
*Proses isokorik* adalah proses yang dialami oleh gas di mana gas tidak mengalami perubahan volume atau volume tetap ( $\Delta V = 0$ ). Oleh karena itu, usaha yang dilakukan gas pada proses isokorik adalah nol ( $W = P \times 0 = 0$ ). Perhatikan Gambar 9.5!



**Gambar 9.5** Proses Isokorik

### c. Proses Isotermis

*Proses isotermis* adalah proses yang dialami gas pada suhu tetap. Usaha yang dilakukan gas pada proses ini tidak dapat dihitung dengan persamaan  $W = P \times \Delta V$ . Hal ini dikarenakan tekanannya tidak konstan. Namun, dapat diselesaikan dengan melakukan pengintegralan ( $W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$ )



**Gambar 9.6** Proses Isotermis

Ingat,  $P = \frac{nRT}{V}$ , maka  $W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV$ . Karena  $n$ ,  $R$ , dan  $T$  konstan, maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$W = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT [\ln V]_{V_1}^{V_2} = nRT [\ln V_2 - \ln V_1]$$

$$W = nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

### d. Proses Adiabatik

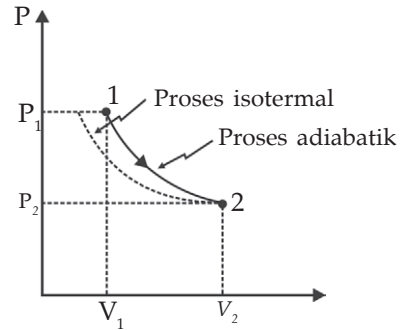
Pada proses isobarik, isotermis, dan isokorik dipengaruhi oleh lingkungan, yaitu menerima atau melepaskan kalor. Proses adiabatik merupakan proses yang tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem (gas) ke lingkungan ( $\Delta Q = 0$ ). Hal ini dapat terjadi apabila

terdapat sekat yang tidak menghantarkan kalor atau prosesnya berlangsung cepat. Pada proses adiabatik berlaku rumus Poisson.

$$PV^\gamma = \text{Konstan atau } P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

Dengan  $\gamma$  merupakan perbandingan kalor jenis gas pada tekanan tetap ( $C_p$ ) dan kalor jenis gas pada volum tetap ( $C_v$ ). Selanjutnya perbandingan ini dinamakan tetapan Laplace

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$



**Gambar 9.7** Proses Adiabatik

Untuk gas ideal ( $P = \frac{nRT}{V}$ ), persamaan adiabatik di atas dapat ditulis dalam bentuk

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} V_1^\gamma = \frac{nRT_2}{V_2} V_2^\gamma$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

Adapun usaha pada proses adiabatik dapat dicari dengan cara sebagai berikut.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Karena  $P = CV^{-\gamma}$ , maka:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} CV^{-\gamma} dV = \frac{C}{1-\gamma} V^{1-\gamma} \Big|_{V_1}^{V_2} = \frac{C}{1-\gamma} V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}.$$

Karena  $c = P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ , maka  $W = \frac{1}{1-\gamma} (P_2 V_2^\gamma V_2^{1-\gamma} - P_1 V_1^\gamma V_1^{1-\gamma})$

$$W = \frac{1}{1-\gamma} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$



## UJI PEMAHAMAN

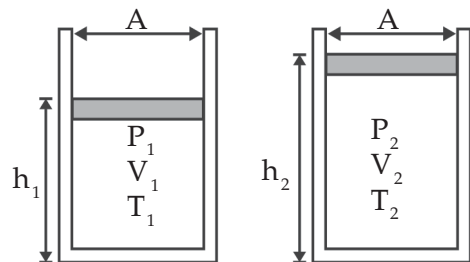
Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!

1. Jelaskan jika pada proses isobarik, isotermis, dan isokorik berlaku hukum Gay Lussac!
2. Suatu tabung tertutup yang volumenya 600 liter berisi gas bertekanan 6 atm. Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gas jika gas memuai pada tekanan tetap sehingga volumenya 3 kali volum semula dan jika gas dimampatkan pada tekanan tetap sehingga volumenya menjadi setengah kali semula ( $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ pa}$ )!
3. Apakah yang dimaksud dengan proses irreversibel dan apa pula yang dimaksud dengan proses reversibel?
4. Sebuah tabung berisi 16 liter gas dengan tekanan 0,8 atm dan suhu 50 K. Jika gas dipanaskan sehingga volumenya menjadi 24 liter dengan mempertahankan tekanannya (isobarik). Berapa suhu akhir yang dimiliki gas tersebut?
6. Perbandingan volume gas yang dipanaskan secara isobarik adalah 2 : 5. Berapakah perbandingan suhu awal dan suhu akhirnya?
7. Sejumlah gas mula-mula volumenya 12,5 liter, tekanannya 1,5 atm dan suhunya 150 K. Jika gas mengalami proses isokorik sehingga tekanannya menjadi 2 atm, maka bagaimana dengan suhunya?

## 2. Usaha Luar (W) dan Energi Dalam (U)

### a. Usaha Luar (W)

Sistem gas melakukan usaha luar apabila volume sistem bertambah. Dengan bertambahnya volume ini, sistem melakukan usaha untuk melawan tekanan udara di luar sistem. Perhatikan Gambar 9.8! Sistem gas mula-mula berada dalam kondisi  $P_1$ ,  $V_1$ , dan  $T_1$  berada dalam ruang yang salah satu sisinya dibatasi torak. Pada kasus ini dinding berupa dinding diatermal. Ketika sistem menyerap kalor secara isobarik, maka akan terjadi perubahan volume sistem menjadi  $V_2$  dimana  $V_2 > V_1$ . Usaha luar yang dilakukan oleh sistem gas dapat dijabarkan sebagai berikut.



Gambar 9.8 Gas melakukan usaha luar.



$$W = F \cdot s$$

Karena  $F = p A$ , maka:

$$\begin{aligned} W &= (PA)s \\ &= (PA) \times (h_2 - h_1) \\ &= P (A h_2 - A h_1) \\ &= P (V_2 - V_1) \end{aligned}$$

$$W = P \times \Delta V$$

Keterangan:

$W$  : usaha luar

$P$  : tekanan sistem

$\Delta V$  : perubahan volume



### CONTOH SOAL

Suatu sistem gas berada dalam ruang yang fleksibel. Pada awalnya gas berada pada kondisi  $P_1 = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ,  $T_1 = 27^\circ \text{ C}$ , dan  $V_1 = 12 \text{ liter}$ . Ketika gas menyerap kalor dari lingkungan secara isobarik suhunya berubah menjadi  $127^\circ \text{ C}$ . Hitunglah volume gas sekarang dan besar usaha luar yang dilakukan oleh gas!

$$\begin{aligned} \text{Diketahui} : P_1 &= 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ T_1 &= 27 + 273 = 300 \text{ K} \\ V_1 &= 12 \text{ liter} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \\ T_2 &= 127 + 273 = 400 \text{ K} \\ P_2 &= P_1 \text{ (isobarik)} \end{aligned}$$

Ditanyakan: a.  $V_2 = \dots ?$

b.  $W = \dots ?$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } \frac{V_1}{T_1} &= \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_1 = \frac{400}{300} \times 1,2 \cdot 10^{-2} \\ &= 1,6 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Jadi, volume gas akhir sebesar  $1,6 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ .

$$\begin{aligned} \text{b. } W &= P \times \Delta V = P \times (V_2 - V_1) \\ &= 1,5 \times 10^5 (1,6 \times 10^{-2} - 1,2 \times 10^{-2}) \\ &= (1,5 \times 10^5) \times (0,4 \times 10^{-2}) \\ &= 0,6 \times 10^3 \\ &= 6 \times 10^4 \text{ J} \end{aligned}$$

Jadi usaha luar yang dilakukan oleh gas sebesar  $W = 6 \times 10^4 \text{ J}$

## b. Energi Dalam (U) Gas Monoatomik

Coba Anda ingat lagi pada pembahasan sebelumnya tentang teori kinetik gas. Berapa energi kinetik total yang dimiliki oleh sistem yang terdiri atas  $N$  buah partikel gas? Besarnya energi total ini disebut sebagai “energi dalam” sistem, yaitu  $U = N \cdot E_k$ .

Karena  $N \times E_k = \frac{3}{2} PV$ , maka  $U = \frac{3}{2} PV$  dan dengan melihat lagi persamaan gas ideal  $pV = nRT$ , maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$U = \frac{3}{2} nRT$$

Berdasarkan persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa suatu sistem gas akan mengalami perubahan energi dalamnya jika mengalami perubahan suhu.



### CONTOH SOAL

Suatu gas yang berada dalam ruang yang fleksibel memiliki tekanan  $1,5 \times 10^5$  Pa, suhu  $27^\circ \text{C}$ , dan volume 12 liter. Ketika gas menyerap kalor suhunya menjadi  $127^\circ \text{C}$ . Hitunglah energi gas mula-mula, volume gas sekarang, energi dalam sistem gas sekarang!

Diketahui :  $P_1 = 1,5 \times 10^5$  Pa                       $T_1 = 27 + 273 = 300$  K  
 $V_1 = 12$  liter  $= 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$                $T_2 = 127 + 273 = 400$  K

Ditanyakan: a.  $U_1 = \dots?$   
b.  $V_2 = \dots?$   
c.  $U_2 = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } U_1 &= n R T_1 = \frac{3}{2} P_1 V_1 = \frac{3}{2} (1,5 \times 10^5) \times (1,2 \cdot 10^{-2}) \\ &= 2,7 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } \frac{V_1}{T_1} &= \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_1 = \frac{400}{300} \times (1,2 \times 10^{-2}) \\ &= 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. } U_2 &= n R T_2 = \frac{3}{2} P_2 V_2 = \frac{3}{2} \times (1,5 \times 10^5) \times (1,6 \times 10^{-2}) \\ &= 3,6 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$



## UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Jika sejumlah gas berada di dalam ruang tertutup suhu, maka tekanan dan volumenya berubah. Bagaimana pengaruhnya antara besaran yang satu dengan besaran yang lain?
2. Gas dalam ruang tertutup yang semula volumenya 24 liter, tekanannya 1,5 atm dan suhunya 200 K ditekan secara ideal dengan volume tetap. Jika tekanannya berubah menjadi 3 atm, maka bagaimana dengan suhunya?
3. Dengan mengusahakan tekanannya tetap, gas dari 36 liter, suhu 140 K dan tekanan  $1,5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  volumenya diubah menjadi 9 liter. Berapa suhu yang dimiliki gas ?
4. Sejumlah gas sebanyak 20 liter, dengan tekanan  $1,25 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  serta suhunya 100 K mengalami proses isotermik. Jika tekanannya berubah menjadi  $5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ , maka bagaimana dengan volumenya?
5. Gas yang volumenya 35 liter dipanaskan dengan tekanan tetap sehingga volumenya menjadi 50 liter. Jika tekanan mula-mula  $1,75 \times 10^5 \text{ Pa}$ , maka berapa besar usaha yang dilakukan gas tersebut?
6. Pada suatu ruang tertutup terdapat 15 liter gas dengan suhu  $27^\circ \text{C}$  dan tekanan  $90.000 \text{ N/m}^2$ . Karena menyerap kalor dari lingkungannya isobarik, maka suhu gas berubah menjadi  $227^\circ \text{C}$ . Berapakah volume gas pada akhir proses ini?
7. Sebanyak 10 liter gas suhunya  $27^\circ \text{C}$  tekanannya  $1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Jika gas menyerap kalor dengan proses isobarik sampai suhu  $127^\circ \text{C}$ , maka berapakah energi dalam gas mula-mula dan volume akhir gas?
8. Pada suatu ruangan ideal terdapat 18 liter gas yang suhunya  $27^\circ \text{C}$  dengan tekanan  $2,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Karena gas menyerap kalor suhunya meningkat menjadi  $327^\circ \text{C}$ . Hitunglah:
  - a. energi dalam mula-mula,
  - b. volume akhir gas,
  - c. energi dalam akhir, dan
  - d. perubahan energi dalamnya!
9. Sebuah gas memiliki volume 20 liter, suhu  $127^\circ \text{C}$ , dan tekanan  $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Tentukanlah jumlah molekul gasnya dan energi dalam gas!

### 3. Hukum I Termodinamika

Apabila sistem gas menyerap kalor dari lingkungan sebesar  $Q_1$ , maka oleh sistem mungkin akan diubah menjadi:

- usaha luar ( $W$ ) dan perubahan energi dalam ( $\Delta U$ ),
- energi dalam saja ( $U$ ), dan
- usaha luar saja ( $W$ ).

Secara sistematis, peristiwa di atas dapat dinyatakan sebagai:

$$Q = W + U$$

Persamaan ini dikenal sebagai persamaan untuk hukum I Termodinamika. Bunyi hukum I Termodinamika adalah “Energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, melainkan hanya bisa diubah bentuknya saja.” Berdasarkan uraian tersebut terbukti bahwa kalor ( $Q$ ) yang diserap sistem tidak hilang. Oleh sistem, kalor ini akan diubah menjadi usaha luar ( $W$ ) dan atau penambahan energi dalam ( $\Delta U$ ).



#### CONTOH SOAL

Suatu sistem gas monoatomik pada suhu  $27^\circ \text{C}$  memiliki tekanan sebesar  $1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$  dan bervolume 15 liter. Sistem menyerap kalor dari lingkungan secara isobarik sehingga suhunya naik menjadi  $127^\circ \text{C}$ . Tentukan volume gas sekarang, usaha luar yang dilakukan gas, penambahan energi dalam gas, dan besarnya kalor yang diserap gas!

Diketahui :  $T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$$P_1 = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$V_1 = 15 \text{ liter} = 15 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$T_2 = 127 + 273 = 400 \text{ K}$$

Ditanyakan: a.  $V_2 = \dots?$

b.  $W = \dots?$

c.  $\Delta U = \dots?$

d.  $Q = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{a. } \frac{V_1}{T_1} &= \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_1 = \frac{400}{300} \times (1,5 \times 10^{-3}) \\ &= 20 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } W &= PV = P(V_2 - V_1) = (1,5 \times 10^5) \times (20 \times 10^{-3}) - (15 \times 10^{-3}) \\ &= (1,5 \times 10^5) \times (5 \times 10^{-3}) \\ &= 7,5 \times 10^2 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c. } U &= (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \frac{3}{2} P (V_2 - V_1) \\
 &= \frac{3}{2} \times (1,5 \times 10^5) \times (5 \times 10^{-3}) \\
 &= \frac{3}{2} \times (7,5 \times 10^2) \\
 &= 11,25 \times 10^2 \text{ J} \\
 \text{d. } Q &= W + U = (7,5 \times 10^2) + (11,25 \times 10^2) \\
 &= 18,75 \times 10^2 \text{ J}
 \end{aligned}$$



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Tuliskan 3 kemungkinan yang akan terjadi jika sejumlah gas menyerap kalor dari lingkungan tempatnya berada ?
2. Bagaimana pernyataan hukum I termodinamika tentang energi?
3. Apakah yang dimaksud proses isothermal pada termodinamika ?
4. Sejumlah gas ideal volumenya  $0,8 \text{ m}^3$  dengan tekanan  $200 \text{ N/m}^2$ . Jika jumlah gas adalah  $0,4 \text{ mol}$ , maka berapakah suhu mutlak yang dimiliki oleh gas tersebut?
5. Dalam sebuah silinder kaca yang volumenya  $5 \text{ liter}$  terdapat  $0,6 \text{ mol}$  gas dengan suhu  $27^\circ \text{C}$ . Jika gas ditekan dengan suhu tetap sampai volumenya  $4 \text{ liter}$  dengan tekanan awal  $5.000 \text{ N/m}^2$ , maka tentukan usaha yang diterima gas dari lingkungannya?

## 4. Hukum II Termodinamika

Hukum I termodinamika menyatakan bahwa energi adalah kekal, tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Energi hanya dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Berdasarkan teori ini, Anda dapat mengubah energi kalor ke bentuk lain sesuka Anda asalkan memenuhi hukum kekekalan energi.

Namun, kenyataannya tidak demikian. Energi tidak dapat diubah sekehendak Anda. Misalnya, Anda menjatuhkan sebuah bola besi dari suatu ketinggian tertentu. Pada saat bola besi jatuh, energi potensialnya berubah menjadi energi kinetik. Saat bola besi menumbuk tanah,

sebagian besar energi kinetiknya berubah menjadi energi panas dan sebagian kecil berubah menjadi energi bunyi. Sekarang, jika prosesnya Anda balik, yaitu bola besi Anda panaskan sehingga memiliki energi panas sebesar energi panas ketika bola besi menumbuk tanah, mungkinkah energi ini akan berubah menjadi energi kinetik, dan kemudian berubah menjadi energi potensial sehingga bola besi dapat naik? Peristiwa ini tidak mungkin terjadi walau bola besi Anda panaskan sampai meleleh sekalipun.

Hal ini menunjukkan proses perubahan bentuk energi di atas hanya dapat berlangsung dalam satu arah dan tidak dapat dibalik. Proses yang tidak dapat dibalik arahnya dinamakan *proses irreversibel*. Proses yang dapat dibalik arahnya dinamakan *proses reversibel*.

Peristiwa di atas mengilhami terbentuknya hukum II termodinamika. Hukum II termodinamika membatasi perubahan energi mana yang dapat terjadi dan yang tidak dapat terjadi. Pembatasan ini dapat dinyatakan dengan berbagai cara, antara lain, hukum II termodinamika dalam pernyataan aliran kalor: *"Kalor mengalir secara spontan dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah dan tidak mengalir secara spontan dalam arah kebalikannya"*; hukum II termodinamika dalam pernyataan tentang mesin kalor: *"Tidak mungkin membuat suatu mesin kalor yang bekerja dalam suatu siklus yang semata-mata menyerap kalor dari sebuah reservoir dan mengubah seluruhnya menjadi usaha luar"*; hukum II termodinamika dalam pernyataan entropi: *"Total entropi semesta tidak berubah ketika proses reversibel terjadi dan bertambah ketika proses ireversibel terjadi"*.

### a. Entropi

Entropi adalah ukuran banyaknya energi atau kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha. Besarnya entropi suatu sistem yang mengalami proses reversibel sama dengan kalor yang diserap sistem dan lingkungannya ( $\Delta Q$ ) dibagi suhu mutlak sistem tersebut ( $T$ ). Perubahan entropi diberi tanda  $\Delta S$  dan dinyatakan sebagai berikut.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Ciri proses reversibel adalah perubahan total entropi ( $\Delta S = 0$ ) baik bagi sistem maupun lingkungannya. Pada proses irreversibel perubahan entropi  $\Delta S_{\text{semesta}} > 0$ . Proses irreversibel selalu menaikkan entropi semesta.

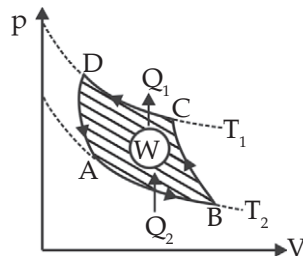
$$\Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} = \Delta S_{\text{seluruhnya}} \geq 0$$

## b. Mesin Pendingin

Mesin yang menyerap kalor dari suhu rendah dan mengalirkannya pada suhu tinggi dinamakan mesin pendingin (refrigerator). Misalnya pendingin ruangan (AC) dan almari es (kulkas).

Perhatikan Gambar 9.9! Kalor diserap dari suhu rendah  $T_2$  dan kemudian diberikan pada suhu tinggi  $T_1$ . Berdasarkan hukum II termodinamika, kalor yang dilepaskan ke suhu tinggi sama dengan kerja yang ditambah kalor yang diserap ( $Q_1 = Q_2 + W$ )

Hasil bagi antara kalor yang masuk ( $Q_1$ ) dengan usaha yang diperlukan ( $W$ ) dinamakan koefisien daya guna (performansi) yang diberi simbol  $K_p$ . Secara umum, kulkas dan pendingin ruangan memiliki koefisien daya guna dalam jangkauan 2 sampai 6. Makin tinggi nilai  $K_p$ , makin baik kerja mesin tersebut.



**Gambar 9.9** Siklus mesin pendingin.

$$K_p = \frac{Q_2}{W}$$

Untuk gas ideal berlaku:

$$K_p = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Keterangan

$K_p$  : koefisien daya guna

$Q_1$  : kalor yang diberikan pada reservoir suhu tinggi (J)

$Q_2$  : kalor yang diserap pada reservoir suhu rendah (J)

$W$  : usaha yang diperlukan (J)

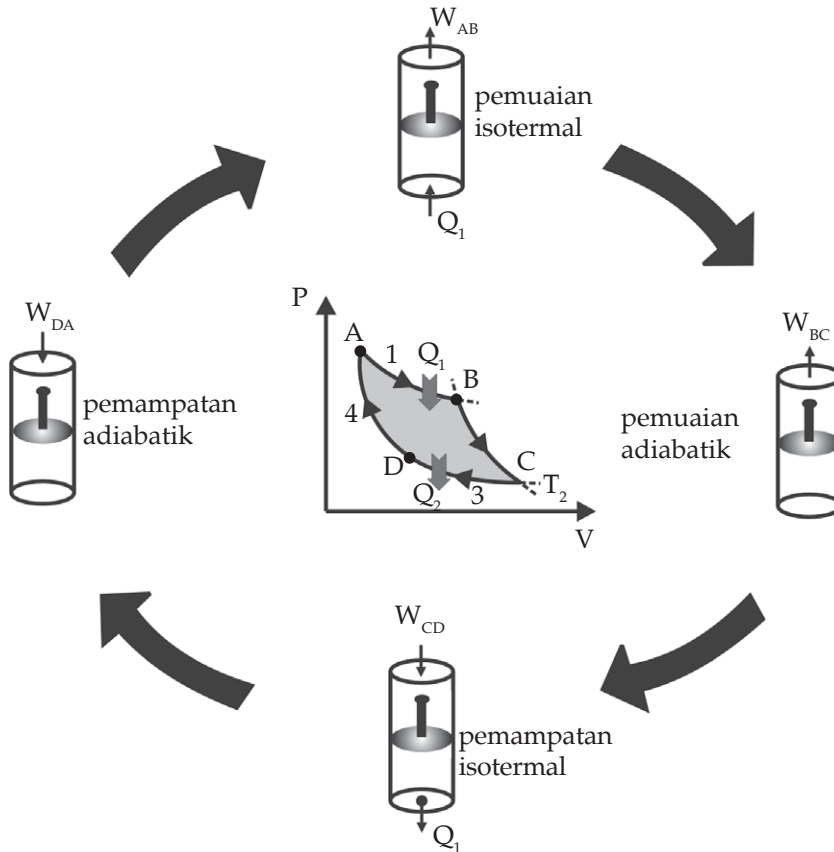
$T_1$  : suhu reservoir suhu tinggi (K)

$T_2$  : suhu reservoir suhu rendah (K)

## G. Mesin Carnot

*Siklus* adalah suatu rangkaian sedemikian rupa sehingga akhirnya kembali kepada keadaan semula. Berdasarkan percobaan joule diketahui bahwa tenaga mekanik dapat seluruhnya diubah menjadi energi kalor. Namun, apakah energi kalor dapat seluruhnya diubah menjadi energi mekanik? Adakah mesin yang dapat mengubah kalor seluruhnya

menjadi usaha? Pada tahun 1824, seorang insinyur berkebangsaan Prancis, Nicolas Leonardi Sadi Carnot, memperkenalkan metode baru untuk meningkatkan efisiensi suatu mesin berdasarkan siklus usaha. Metode efisiensi Sadi Carnot ini selanjutnya dikenal sebagai *siklus Carnot*. Siklus Carnot terdiri atas empat proses, yaitu dua proses isothermal dan dua proses adiabatik. Perhatikan Gambar 9.10!



**Gambar 9.10** Siklus Carnot.

Berdasarkan Gambar 9.10 dijelaskan siklus carnot sebagai berikut.

1. Proses AB adalah pemuai isothermal pada suhu  $T_1$ . Pada proses ini sistem menyerap kalor  $Q_1$  dari reservoir bersuhu tinggi  $T_1$  dan melakukan usaha  $W_{AB}$ .
2. Proses BC adalah pemuai adiabatik. Selama proses ini berlangsung suhu sistem turun dari  $T_1$  menjadi  $T_2$  sambil melakukan usaha  $W_{BC}$ .
3. Proses CD adalah pemampatan isothermal pada suhu  $T_2$ . Pada proses ini sistem menerima usaha  $W_{CD}$  dan melepas kalor  $Q_2$  ke reservoir bersuhu rendah  $T_2$ .
4. Proses DA adalah pemampatan adiabatik. Selama proses ini suhu sistem naik dari  $T_2$  menjadi  $T_1$  akibat menerima usaha  $W_{DA}$ .



Siklus Carnot merupakan dasar dari mesin ideal yaitu mesin yang memiliki efisiensi tertinggi yang selanjutnya disebut *Mesin Carnot*. Usaha total yang dilakukan oleh sistem untuk satu siklus sama dengan luas daerah di dalam siklus pada diagram P - V. Mengingat selama proses siklus Carnot sistem menerima kalor  $Q_1$  dari reservoir bersuhu tinggi  $T_1$  dan melepas kalor  $Q_2$  ke reservoir bersuhu rendah  $T_2$ , maka usaha yang dilakukan oleh sistem menurut hukum I termodinamika adalah sebagai berikut.

$$Q = \Delta U + W \Rightarrow Q_1 - Q_2 = 0 + W \Rightarrow W = Q_1 - Q_2$$

Dalam menilai kinerja suatu mesin, efisiensi merupakan suatu faktor yang penting. Untuk mesin kalor, efisiensi mesin ( $\eta$ ) ditentukan dari perbandingan usaha yang dilakukan terhadap kalor masukan yang diberikan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

Untuk siklus Carnot berlaku hubungan  $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ , sehingga efisiensi mesin Carnot dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \times 100\%$$

Keterangan:

$\eta$  : efisiensi mesin Carnot

$T_1$  : suhu reservoir bersuhu tinggi (K)

$T_2$  : suhu reservoir bersuhu rendah (K)

Efisiensi mesin Carnot merupakan efisiensi yang paling besar karena merupakan mesin ideal yang hanya ada di dalam teori. Artinya, tidak ada mesin yang mempunyai efisien melebihi efisiensi mesin kalor Carnot. Berdasarkan persamaan di atas terlihat efisiensi mesin kalor Carnot hanya tergantung pada suhu kedua tandon atau reservoir. Untuk mendapatkan efisiensi sebesar 100%, suhu tandon  $T_2$  harus = 0 K. Hal ini dalam praktik tidak mungkin terjadi. Oleh karena itu, mesin kalor Carnot adalah mesin yang sangat ideal. Hal ini disebabkan proses kalor Carnot merupakan proses reversibel. Sedangkan kebanyakan mesin biasanya mengalami proses irreversibel (tak terbalikkan).



### CONTOH SOAL

Sebuah mesin Carnot menyerap kalor sebesar 1.000 kJ. Mesin ini bekerja pada reservoir bersuhu 300 K dan 100 K. Berapa kalor yang terbuang oleh mesin?

Diketahui :  $T_1 = 300 \text{ K}$   
 $T_2 = 200 \text{ K}$   
 $Q_1 = 1.000 \text{ kJ}$

Ditanyakan:  $Q_2 = \dots?$

Jawab :

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \times 100\% = 1 - \frac{200}{300} \times 100\%$$

$$= 33,33\% = \frac{1}{3}$$

Untuk menghitung  $Q_2$ , dapat Anda gunakan persamaan efisiensi:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

$$\frac{1}{3} = 1 - \frac{Q_2}{1.000} \Rightarrow Q_2 = 333,3 \text{ kJ}$$

Jadi, kalor yang terbuang oleh mesin sebesar 333,3 kJ.



### UJI PEMAHAMAN

*Kerjakan soal-soal di bawah ini di dalam buku tugas Anda!*

1. Reservoir suhu rendah suatu mesin Carnot mempunyai energi 120.000 joule. Apakah artinya jika mesin tersebut mempunyai efisiensi 80%?
2. Sebuah mesin Carnot mempunyai suhu pada reservoir rendah dan tingginya adalah  $27^\circ \text{C}$  dan  $227^\circ \text{C}$ . Berapakah perbandingan usaha yang telah terjadi?
3. Jika perbandingan antara energi pada suhu rendah dan suhu tinggi suatu mesin Carnot adalah 3 : 4, maka berapakah efisiensi yang dimiliki mesin tersebut?

## UJI KOMPETENSI

1. Sejumlah gas ideal menjalani proses isobarik sehingga volumenya menjadi 3 kali semula. Hitunglahnya suhu gas tersebut sekarang!
2. Dalam ruang tertutup suatu gas dipanaskan dari suhu  $27^{\circ}\text{C}$  menjadi  $127^{\circ}\text{C}$ . Jika tekanannya tetap, maka hitung perubahan volumenya!
3. Suatu gas pada suhu  $127^{\circ}\text{C}$  mempunyai volume 200 liter. Berapakah tekanan gas tersebut?
4. Dalam ruang tertutup sejumlah gas memperoleh tekanan 1,5 atm dan suhu  $27^{\circ}\text{C}$ . Jika dipanaskan hingga volumenya menjadi 2 kali semula, maka berapa Celsius kenaikan suhunya?
5. Sejumlah gas yang mula-mula volumenya 15 liter tekanannya  $14 \times 10^5 \text{ Pa}$  pada suhu  $27^{\circ}\text{C}$ . Jika suhunya dinaikkan menjadi 350 K dan volumenya menjadi 10 liter, maka berapa tekanannya?
6. Pada temperatur tertentu, kecepatan “rms” suatu gas ideal adalah  $v$ . Jika pada tekanan konstan volume gas diekspansikan menjadi 3 kali semula, maka hitung kecepatan “rms” molekul gas ideal tersebut!
7. Suatu gas monoatomik suhunya 400 K. Berapakah energi kinetik rata-rata tiap molekul tersebut?
8. Mesin Carnot dioperasikan antara 2 reservoir kalor masing-masing suhunya  $T_1$  dan  $T_2$ , dengan  $T_2 > T_1$ . Diketahui efisiensi mesin tersebut 40%, dan besarnya  $T_1 = 27^{\circ}\text{C}$ . Agar efisiensinya naik menjadi 60%, maka tentukan besarnya perubahan  $T_2$ !
9. Sebuah mesin Carnot yang bekerja antara reservoir kalor bersuhu rendah  $27^{\circ}\text{C}$  dan reservoir kalor bersuhu tinggi  $T_2^{\circ}\text{C}$ , ditingkatkan efisiensi maksimumnya dari 25% hingga menjadi 50% dengan menaikkan suhu  $T_2^{\circ}\text{C}$  menjadi  $T_3^{\circ}\text{C}$ . Hitunglah suhu  $T_2$  dan  $T_3$ !
10. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan reservoir suhu tinggi 800 K mempunyai efisiensi sebesar 40%. Agar efisiensinya naik menjadi 50%, maka hitunglah suhu reservoir suhu tingginya!



## REFLEKSI

Setelah Anda mempelajari keseluruhan materi pada bab ini, buatlah sebuah peta konsep versi Anda. Anda bebas membuat model, bentuk, dan isinya. Bandingkan peta konsep Anda dengan teman sekelas. Diskusikan bersama peta konsep mana yang paling lengkap dan mudah dipahami. Jika kesulitan, maka mintalah pendapat guru atau orang yang berkompeten di bidang ini!

# ULANGAN BLOK SEMESTER GENAP

*Kerjakanlah soal-soal di bawah ini di buku tugas Anda!*

1. Bongkahan es yang volumenya  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$  terapung di air yang mempunyai massa jenis  $1 \text{ g/cm}^3$ . Jika bagian dari bongkahan es yang berada di atas permukaan air adalah  $10^6 \text{ m}^3$ , maka berapakah besar gaya ke atas yang dirasakan bongkahan es tersebut?
2. Berapakah besarnya energi dalam yang dimiliki oleh mol gas yang suhunya  $127^\circ \text{ C}$ ?
3. Melalui sebuah kran sebuah bak penampung diisi air bersih dengan debit kran  $600 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Jika percepatan gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$  dan pembuangan air bersih bocor seluas  $3 \text{ cm}^2$ , maka berapakah ketinggian maksimum yang dicapai air di dalam bak penampung air bersih tersebut!
4. Pada suhu berapakah terjadi energi kinetik yang dimiliki molekul gas menjadi dua kali semula jika suhu awalnya  $400 \text{ K}$ ?
5. Sebuah silinder berongga yang tipis memiliki diameter  $400 \text{ cm}$  dan berotasi melalui sumbunya dalam waktu 1 menit dapat berputar 20 kali. Jika massa silinder berongga tersebut  $9 \text{ kg}$ , maka tentukan momen kelembamannya dan energi kinetik rotasinya!
6. Sejumlah gas dengan massa jenis  $2,14$  mengalir di dalam sebuah pipa. Untuk mengukur kelajuan aliran gas tersebut digunakan sebuah tabung pitot. Jika ketinggian raksa pada kedua kaki manometer tabung pitot adalah  $2 \text{ cm}$ , maka berapakah kelajuan aliran gas tersebut?
7. Berapa besarnya energi kinetik sebuah atom gas Helium pada suhu  $327^\circ \text{ C}$  jika diketahui konstanta Boltzman  $1,38 \times 10^{-23}$ ?
8. Satu mol gas ideal menempati suatu silinder berpengisap tanpa gesekan, mula-mula mempunyai suhu  $T$ . Gas tersebut kemudian dipanaskan pada tekanan konstan sehingga volumenya menjadi 4 kali lebih besar. Bila  $R$  adalah tetapan gas universal, maka tentukan besarnya usaha yang telah dilakukan oleh gas untuk menaikkan volumenya!

9. Pada suhu  $21^{\circ}\text{C}$  satu molekul gas nitrogen mempunyai massa sebesar empat kali dari yang dimiliki satu molekul gas Hidrogen. Dengan suhu berapakah gas Nitrogen akan mempunyai kecepatan sama dengan gas Hidrogen?
10. Sebuah mesin kalor Carnot bekerja di antara dua reservoir bersuhu  $527^{\circ}\text{C}$  dan  $127^{\circ}\text{C}$ . Tentukan efisiensi mula-mula dan terakhir mesin tersebut!!

# KUNCI JAWABAN

## Uji Kompetensi

### BAB 1

4. 5,5 m
6.  $y = 36 \text{ m}$ ;  $v = 16 \text{ m/s}$ ;  
 $a = -2 \text{ ms}^2$
8. a.  $2 \text{ rad} + 50.t \text{ rad}$   
b.  $2.502 \text{ rad}$

### BAB 2

1. b. 57,81 juta km
2.  $2,555 \times 10^{26} \text{ N}$
3. a.  $1,3549 \times 10^{12} \text{ s}$

### BAB 3

2. a. salah      b. 40 kg
4. 90 J
6. 0,8 m
8. 0,75 m
10. 0,1 m

### BAB 4

2.  $v = 2\pi \text{ m/s}$ ;  $a = 0 \text{ m/s}^2$
4. 0,2 kg
8. 0,144 m
10.  $500 \text{ N/m}$

### BAB 5

2.  $700\sqrt{3}$
4.  $10\sqrt{2} \text{ m/s}$
6. 0,8 m

### BAB 6

1. 0,1 m/s
2. 14 m/s
3. 25.000 N
4. a.  $4.000 \text{ kg.m/s}$

### BAB 7

1.  $1,25 \text{ kg.m}^2/\text{s}$
5. a. 100 N  
b.  $50 \text{ ctg } \alpha$   
c. 0,5 ctg

### BAB 8

1. terapung di air
2. 3 cm
3.  $0,8 \text{ gr/cm}^3$
4. 0,75 bagian
5.  $5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

### BAB 9

2. 4/3 dari semula
4.  $327^\circ\text{C}$
5.  $2,45 \times 10^6 \text{ Pa}$

## DAFTAR PUSTAKA

- Alonso, Finn. 1980. *Fundamental University Physics*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Beiser, A. 1962. *The Mainstream of Physical Science*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Boas, Mary, L. 1961. *Mathematical Methods in The Physical Science*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Departemen Pendidikan dan Olah Raga. 2006. *Standar Kompetensi dan Kompetensi Dasar Sekolah Menengah Atas (SMA)/Madrasah Aliyah (MA)*. Jakarta.
- Farndon, John. 2005. *Planet Bumi, Pakar Raya*. Bandung
- Holliday Resnick. 1991. *Fisika Jilid I (Edisi terjemah)*. Jakarta: Erlangga.
- Ikhsan Hadisudarmo, Ir; Dalyono, Petunjuk praktek Fisika teknik 1, *Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Jakarta, 1979*
- Johannes. 1978. *Listrik dan Magnet*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Hudson Tiner, John. 2005. *100 Ilmuwan yang Berpengaruh dalam Sejarah Dunia*. Karisma Publishing Group. Batam.
- Kertiasa, Nyoman. 2000. *Fisika untuk Sekolah Menengah Umum Kelas 1*. Departemen Pendidikan Nasional.
- Kraus Karl, Beiser A. 1991. *The Physical Universe*. New York: Mv Graw-Hill, Inc.
- Michael Abbotet. 1989. *Teori dan Soal-soal Termodinamika (Edisi Terjemah)*. Jakarta: Erlangga.
- Nicholas Margaret & Edy Soetrisno. 2001. *100 Tokoh Besar yang Membentuk Sejarah Dunia*. Intimedia & Ladang Pustaka. Jakarta.
- Parragon & Edy Soetrisno. 2003. *Buku Pintar para Pembuat Sejarah*. Ladang Pustaka & Intimedia. Jakarta.
- Pudak Scientific. 1998. *Panduan contoh-contoh Percobaan untuk Sekolah Menengah Umum, Optika*. Bandung.

- ....., 1998. *Panduan contoh-contoh Percobaan untuk Sekolah Menengah Umum-Listrik dan Magnet*. Bandung.
- ....., 1998. *Panduan contoh-contoh Percobaan untuk Sekolah Menengah Umum-Gelombang dan Termodinamika*. Bandung.
- ....., 1998. *Panduan contoh-contoh Percobaan untuk Sekolah Menengah Umum-Mekanika*. Bandung.
- Sears, F W et all. 1983. *University Physics I*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Soepono, MSc. 1979. *Energi Gelombang dan Medan 1*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Sumadji. Drs. 1981. *Petunjuk Praktikum Ilmu Alam SMA 1*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- ....., 1981. *Petunjuk Praktikum Ilmu Alam SMA 2*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- ....., 1981. *Petunjuk Praktikum Ilmu Alam SMA 3*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.
- Suroso AY, DR; Anna Permana Sari, DR; Kardiawarman, DR, *Ensiklopedi Sains dan Kehidupan*.
- Sutrisno. 1981. *Seri Fisika Dasar*. Bandung : ITB
- ....., 1997. *Seri Fisika Dasar-Mekanika*. Bandung: ITB.
- Wahyudin, DR, Sudrajat, Drs. Mpd, *Ensiklopedi Matematika dan Peradaban Manusia*, Tarity Samudra Berlian, Jakarta, 2003.
- ....., *Ensiklopedi Populer Anak ;* Ichtiar Baru Van Hoeve, Jakarta, 1998



# GLOSARIUM

## A.

- Amplitudo : Sinyangan terjauh  
Aphelium : Jarak terjauh planet ke matahari

## E.

- Elastis : Kemampuan suatu benda untuk kembali ke bentuk semula  
Energi kinetik : Energi yang dimiliki oleh benda yang bergerak  
Energi mekanik : Penjumlahan energi potensial dan energi kinetik  
Energi potensial : Energi yang dimiliki benda karena kedudukannya  
Energi potensial gravitasi : Energi yang dimiliki oleh suatu benda karena kedudukannya dengan ketinggian tertentu  
Energi : Kemampuan untuk melakukan usaha

## F.

- Frekuensi getaran : Jumlah getaran dalam waktu, sekon

## G.

- Gaya elastis : Gaya untuk mempertahankan bentuk  
Gaya sensifugal : Gaya yang arahnya menuju ke luar lingkaran  
Gaya sentipetal : Percepatan gaya yang arahnya menuju pusat lingkaran  
Getaran harmonik: Getaran selaras  
Getaran : Gerakan bolak-balik melalui kedudukan setimbang  
Getaran harmonis : Getaran yang berjalan secara periodik

## H.

- Hukum kekekalan momentum : Jumlah momentum dan sesudah tumbuhkan

## I.

- Impuls : Hasil perkalian antara gaya dan selang waktu tertentu

## K.

- Kecepatan linier : Kecepatan sepanjang keliling lingkaran  
Kepler : Ahli fisika yang mengatakan lintasan planet berbentuk elips  
Konstanta gravitasi : Telpaka gravitasi (G) yang nilainya  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$

## M.

- Modulus Young : Modulus elastis perbandingan antara tegangan dan regangan

Momentum	: Hasil kali antara massa benda dengan kecepatannya
<b>P.</b>	
Percepatan sentipetal	: Percepatan yang arahnya menuju pusat lingkaran
Perihelium	: Jarak terdekat planet ke matahari
Periode getaran	: Waktu untuk sekali bergetar
<b>S.</b>	
Satuan tunggal	: Gerak naik turun melalui titik seimbang dengan lintasan lurus
Simpangan getaran	: Kedudukan tertentu hitung dari titik kesetimbangan
Sirain	: Regang jenis perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang semula.
Skalar	: Besaran yang hanya mempunyai besar
Sstress	: Besaran yang diperoleh dari hasil bagi gaya dengan luasnya
Sudut elevasi	: Sudut yang dibentuk dengan arah mendatar
<b>T.</b>	
Tata surya	: Benda langit yang terdiri dari matahari dan planet yang mengitarinya.
Titik seimbang	: Titik awal gerakan saat benda diam
Tumbukkan sentral	: Tumbukkan segaris
<b>U.</b>	
Usaha	: Hasil kali komponen gaya menurut arah perpindahan dengan perpindahan
<b>V.</b>	
Vector	: Besaran yang mempunyai besar (nilai) dan arah
Vektor perpindahan	: Perubahan vektor posisi
Vektor kecepatan rata-rata	: Rasio vektor perpindahan terhadap selang waktu tertentu
Vektor kecepatan sesaat	: Limit kecepatan vektor rata-rata untuk selang waktu tertentu mendekati nol
Vektor percepatan rata-rata	: Rasio perubahan vektor kecepatan sesaat terhadap selang waktu tertentu
Vektor percepatan sesaat	: Harga limit percepatan rata-rata untuk selang waktu tertentu mendekati nol atau turunan vektor kecepatan terhadap waktu

# INDEKS

## A

Adiabatik 177, 179  
adiabatik 176, 177, 178, 179,  
187  
Archimedes 140, 141, 142,  
143, 163

## B

Bejana berhubungan 148, 149,  
163  
benda tegar 115, 119, 131  
Bernoulli 134, 149, 156, 157,  
158, 159, 160, 161  
bidang miring 126  
Blaise Pascal 135

## E

Efisiensi Mesin Carnot 188  
Energi 35, 44, 52, 52, 53, 57,  
58, 59, 61, 72, 73, 75, 76,  
77, 78, 79, 81, 82, 83, 84,  
85, 86, 87, 88, 89, 90, 91,  
92, 93, 94, 95, 96, 101, 104,  
105, 118, 124, 157  
Energi kinetik 77, 82, 92, 93,  
94  
Energi Mekanik 77, 82, 92, 93  
Energi Potensial 77, 83, 87, 92,  
93, 94  
Entropi 185

## F

Fluida 135, 149, 150, 151, 152,  
153, 155, 156, 157, 162,  
163

## G

Gas Ideal 165, 168, 169, 190  
Gaya luar 103  
Gejala kapilaritas 163  
Gerak 118, 124, 125  
Gerak rotasi 118, 125

## H

Hidrometer 142  
Hukum 97, 102, 103, 104, 105,  
109  
Hukum Boyle 167, 168  
Hukum I Termodinamika 188  
Hukum II Termodinamika 185  
Hukum Kekekalan Energi  
Mekanik 77, 92, 93

## I

Impuls 97, 102, 109

## J

Jarak 79

## K

Kecepatan 82  
Kekekalan Momentum 97,  
102, 103, 104, 105, 109  
Koefisien Restitusi 105  
Kontinuitas 149, 152, 153

## L

lengan Gaya 116  
Lenting Sebagian 104, 105,  
109  
Lenting Sempurna 104, 105,  
109

## M

Mesin Pendingin 186, 187  
Mikroskopik 167  
momen Gaya 115, 116, 123,  
131  
Momen Inersia 119, 122, 123,  
125, 131  
Momen kopel 131  
Momentum 97, 102, 103,  
104, 105, 109

## N

Nicolas Leonardi Sadi Carnot  
187

## P

Perpindahan 79, 80, 94  
Persamaan Bernoulli 157  
Perubahan energi 82, 87  
Proses Adiabatik 176, 177,  
178, 179, 187  
Proses ekspansi 176  
Proses Isobarik 176, 177, 179  
Proses Isokorik 177  
Proses Isotermal 176, 177,  
179, 187

## S

Siklus Carnot 187, 188

## T

Tegangan Permukaan 135,  
144, 145, 146, 147, 163  
Tekanan 135, 136, 137, 138,  
149, 156, 158, 162, 163  
Tetapan Laplace 178  
Titik Berat Benda 129  
Translasi 124, 125  
Tumbukan 102, 103, 104, 105,  
106, 107, 109

## U

Usaha 77, 79, 80, 82, 87, 92,  
94, 176, 177, 178, 179, 185,  
186, 187, 188

## V

Viskositas 150, 151, 155, 163

# DAFTAR PLANET

Data Planet	Nama Planet		
	Merkurius	Venus	Bumi
1. Garis tengah	4.880 km	12.140 km	12.756 km
2. Volume	0,054 vol Bumi	0,88 vol Bumi	1.083.132.717.333
3. Massa jenis.	5,43 g/cm <sup>3</sup>	5,24 g/cm <sup>3</sup>	5,520 g/cm <sup>3</sup>
4. Massa	0,055 massa Bumi	0,82 massa Bumi	6,6 × 10 <sup>24</sup> kg
5. Jarak ke matahari	57,9 × 10 <sup>6</sup> km	108 × 10 <sup>6</sup> km	149 × 10 <sup>6</sup> km
6. Periode rotasi	59 hari	243 hari	23 jam 56 menit
7. Periode revolusi	87,96 hari	224,7 hari	365,25 hari
8. Satelit	-	-	1
9. Suhu	427° C – (-170° C)	480° C	-89° C – 58° C

Data Planet	Nama Planet		
	Mars	Yupiter	Saturnus
1. Garis tengah	6.794 km	142.800 km	120.200 km
2. Volume	0,15 vol Bumi	1.316 vol Bumi	765 vol Bumi
3. Massa jenis	3,9 g/cm <sup>3</sup>	1,34 g/cm <sup>3</sup>	0,70 g/cm <sup>3</sup>
4. Massa	0,11 massa bumi	317,8 massa bumi	95,2 massa Bumi
5. Jarak ke matahari	228 × 10 <sup>6</sup> km	778 × 10 <sup>6</sup> km	1.427.109 km
6. Periode rotasi	24 jam 37 menit	9 jam 50 menit	10 jam 14 menit
7. Periode revolusi	686,98 hari	11,9 tahun	29,5 tahun
8. Satelit	2	39	8 yang diketahui
9. Suhu	-118° C – 0° C	-150° C	-170° C

Data Planet	Nama Planet	
	Uranus	Neptunus
1. Garis tengah	51.000 km	49.500 km
2. Volume	52 vol Bumi	44 vol Bumi
3. Massa jenis	1,50 g/cm <sup>3</sup>	2,30 g/cm <sup>3</sup>
4. Massa	14,5 massa Bumi	17,2 massa Bumi
5. Jarak ke matahari	2.870.109 km	4.497.109 km
6. Periode rotasi	17 jam 14 menit	17 jam 46 menit
7. Periode revolusi	84,0 tahun	164,8 tahun
8. Satelit	15	8
9. Suhu	200° C	210° C

# DAFTAR KONSTANTA

## PANJANG

1 inci = 2,54 cm  
1 mil = 1.609  
1 yard = 91,44 cm  
1 kaki = 30,48 cm  
1 amstrong =  $10^{-8}$  cm  
1 tahun cahaya =  $9,46 \times 10^{13}$  km

## MASSA

1 ton = 10 kwintal = 1.000 kg  
1 kg = 10 ons = 2 pon  
1 kg = 1.000 gr

## WAKTU

1 hari = 24 jam  
1 jam = 60 menit = 3.600 sekon  
1 menit = 60 sekon

## SUHU

$0^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{R} = 32^{\circ}\text{F} = 273\text{K}$   
 $100^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{R} = 212^{\circ}\text{F} = 373\text{K}$

## KUAT ARUS

1 ampere = 1.000 mili ampere  
1 mili ampere = 1.000 mikro ampere

## INTENSITAS CAHAYA

Lilin

## JUMLAH ZAT

Mol

## GAYA

1 newton =  $10^5$  dyne  
1 lb = 4,45 newton

## USAHA (ENERGI)

1 joule = 0,24 kalori  
1 kalori = 4,2 joule  
1 Kwh =  $3,6 \times 10^6$  joule  
1 eV =  $1,6 \times 10^{-19}$  joule

## DAYA

1 HP = 746 watt  
1 watt = joule/sekon

## LUAS

1 hektar = 10.000 m<sup>2</sup>

## VOLUME

1 liter = 1 dm<sup>3</sup>  
1 cc = 1 cm<sup>3</sup>  
1 galon = 3,78 liter

## KECEPATAN

10 m/s = 36 km/jam

## PERCEPATAN

1 m/s<sup>2</sup> = 100 cm/s<sup>2</sup>

## TEKANAN

1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>  
1 atm = 76 cm Hg  
1 atm =  $1,013 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>  
1 bar =  $10^5$ N/m<sup>2</sup>

## KONVERSI

1 tera = 1.000 siaga  
1 giga = 1.000 mega  
1 mega = 1.000 kilo  
1 kilo = 1.000 m  
1 m = 1.000 mm  
1 mm = 1.000 mikro  
1 mikro = 1.000 nano  
1 nano = 1.000.000 piko  
1 piko = 1.000 femto  
1 femto = 1.000 atto

## DIMENSI

Kecepatan =  $LT^1$   
Percepatan =  $LT^2$   
Gaya =  $MLT^2$   
Usaha (Energi) =  $ML^2T$   
Daya =  $ML^2T^3$   
Momentum =  $MLT^1$   
Impuls =  $MLT^1$   
Momen =  $ML^2T^2$   
Tekanan =  $ML^{-1}T^2$   
Massa jenis =  $ML^{-3}$   
Berat jenis =  $ML^{-2}T^2$   
Debit =  $M^3T^{-1}$   
Modulus Young =  $ML^{-1}T^{-2}$   
Tegangan =  $ML^{-1}T^{-2}$   
Momen inersia =  $ML^2$

Joule = watt  $\times$  sekon  
= newton  $\times$  meter  
= volt  $\times$  coulomb  
Volt = ampere  $\times$  ohm  
= watt/ampere

## TETAPAN

$\phi = 3,14$   
percepatan gravitasi =  $10 \text{ m/s}^2$   
gravitasi umum =  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$   
gas umum =  $8,31 \text{ joule/mol.k}$   
Avogadro =  $6,025 \times 10^{-23} \text{ J/K}$   
Boltzman =  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$   
Rydberg =  $1,097 \times 10^7/\text{m}$   
Stefan Boltzman =  $5,672 \times 10^{-6} \text{ watt/m}^2\text{K}^4$   
bilangan natural =  $2,71828$   
dielektrik =  $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^2$   
elektron =  $1,6021 \times 10^{-19}\text{C}$   
=  $9,1091 \times 10^{-31}\text{kg}$   
proton =  $1,6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
netron =  $1,6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
cahaya =  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$   
Planck =  $6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$   
1 sma =  $1,66 \times 10^{-27}\text{kg}$   
=  $931,15 \text{ MeV}$   
1 eV =  $1,6 \times 10^{-19} \text{ joule}$

# FISIKA 2

Mudah dan Sederhana  
SMA dan MA kelas XI

Dengan tema “Fisika Mudah dan Sederhana”, kami berusaha menyajikan konsep-konsep fisika dengan bahasa yang sederhana, menarik, dan mudah dimengerti. Fisika yang selama ini dihindari akan menjadi sesuatu yang mengasyikan dan menantang. Selain penyajian materi yang sesuai tingkat perkembangan anak, buku ini juga menumbuhkan semangat kebhinekaan dan kewirausahaan yang tetap mengapresiasi nilai-nilai kemasyarakatan.

Buku ini diharapkan dapat membantu Anda memahami fisika serta meningkatkan minat untuk belajar ilmu pengetahuan alam secara keseluruhan. Pemahaman yang mendalam tentang kealaman akan membuka ruang lebih luas dalam memahami kekuasaan Tuhan Yang Maha Kuasa.

ISBN 978-979-068-166-8 (no jld lengkap)  
ISBN 978-979-068-171-2

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2007 tanggal 25 Juli 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eeran Tertinggi (HET) Rp11.146,-